

Gerhart Siegmund

UNTERSUCHUNGEN ZUR AUFBEREITUNG
DES MESSELER ÖLSCHIEFER-SCHWELKOKSES
ZUM ZWECKE DER BAUSTOFF-HERSTELLUNG

Frankfurt am Main 1962

Untersuchungen
zur Aufbereitung
des Messeler Ölschiefer-Schwelkokses
zum Zwecke der Baustoff-Herstellung.

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität
in Frankfurt am Main

vorgelegt von
Dipl.-Chem. Gerhart Siegmund
aus Leipzig

1962

Gedruckt mit Genehmigung der Naturwissenschaftlichen Fakultät
der Universität Frankfurt am Main.

Dekan

Prof. Dr. K. Egle

1. Gutachter

Prof. Dr. R. Klar

2. Gutachter

Prof. Dr. H. Hartmann

Tag der mündlichen Prüfung

24. Juli 1962



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung
11	Stand der Technik
12	Zweck der Untersuchungen
13	Fließschema
14	Begriffsbestimmungen
2	Meßwerte
20	allgemeine Kriterien
21	Meßwerte am Produkt
211	Glühverlust
212	Siebanalyse
213	spezifische Oberfläche
22	Meßwerte im Reaktionsablauf
221	Temperatur
222	Produktdurchsatz
223	Luftdurchsatz
2231	Treibluft
2232	Zusatzluft
224	Hilfsgrößen
2241	Heizgas
2242	Heizluft
2243	Druckabfall vor der Einspeisedüse
2244	Druckabfall in der Wirbelschicht
225	Gasanalyse
23	Meßwerte am Enderzeugnis
231	Druckfestigkeit
232	Raumgewicht
3	Produkt
31	Spezifikationen
32	Vorbereitung des Produktes
33	Vorprüfung auf Reaktionsfähigkeit
331	Glühverlust
332	Sintergrenze
333	Aufheizgeschwindigkeit

4	Apparatur
41	Einspeisung
411	Dosierung
412	Klassierung
413	Injektor
414	Luftversorgung
42	Wirbelrohr
43	Wirbelschichtreaktor
44	Abscheidungsteil
441	Zyklon
442	Überlauf
5	Reaktionsablauf
51	Reaktion im Wirbelrohr
511	Beispiel für einen Reaktionsablauf
512	Daten mehrerer Reaktionen
513	Schlußfolgerungen
52	Reaktion in der Wirbelschicht
520	Wirbelschichtzustandsdiagramm
521	Beispiel für einen Reaktionsablauf
522	Daten mehrerer Reaktionen
523	Schlußfolgerungen
6	Verwendung des Abbrandes
61	Beispiel für eine Gasbeton-Rezeptur
62	Beispiel für den Verlauf einer Gießung
63	Eigenschaften der erzeugten Steine
64	Schlußfolgerungen
7	Zusammenfassung
8	Verzeichnisse
81	Verzeichnis der benutzten Symbole
811	Textsymbole
812	Zeichnungssymbole
82	Literaturverzeichnis
9	Anhang

1 Einleitung

11 Stand der Technik

Es ist bekannt, daß Aschen bestimmter Zusammensetzung als Zuschlagstoffe zur Herstellung von Bausteinen verwendet werden können ^{1), 2)}; dabei können mit Hilfe spezieller Rezepturen und Verfahrensbedingungen die Eigenschaften der erzeugten Steine weitgehend variiert und z. B. solche mit sehr geringer Wärmeleitzahl produziert werden.

Es ist ferner bekannt, daß industrielle Zwischenprodukte, die noch nicht als derartige Zuschlagstoffe geeignet sind, durch relativ einfache Behandlung in brauchbare Rohstoffe überführt werden können; so ist es z. B. möglich, die noch bis zu 20% Kohlenstoff enthaltenden Rückstände der Ölschieferverschmelzung in entsprechender Weise zu nutzen ³⁾. Das geschieht in der Praxis dadurch, daß die - die Retorten noch heiß in stückiger Form verlassenden - Rückstände auf Halde gefahren und solcherart unkontrolliert dem Einflusse der Atmosphäre ausgesetzt werden. Der Kohlenstoff ist in diesen Schwelrückständen außerordentlich fein verteilt und so reaktionsfähig, daß er bei Zutritt des Luftsauerstoffes infolge der vorhandenen fühlbaren Wärme des Gutes sofort zündet und, begünstigt durch die Porosität des Materials, nahezu vollständig abbrennt. Nachdem die Reaktion beendet und das Gut abgekühlt ist, kann es abgeräumt, anschließend gemahlen und zur Weiterverarbeitung eingesetzt werden.

Dem geschilderten Verfahren haften jedoch erhebliche Nachteile an. Als Beispiele seien genannt die verhältnismäßig hohen Kosten für die Förderung des Gutes auf die Halde sowie in der Hauptsache die Unmöglichkeit, Dauer sowie Temperatur des Abbrandprozesses zu kontrollieren. Als deren Folge schwanken die Zusammensetzung sowie die Struktur der gewinnbaren Asche, und darüber hinaus bilden sich teilweise außerordentlich umfangreiche Sinter- bzw. Schmelzzonen innerhalb der Halde aus, die deren Abbau stellenweise sehr erschweren oder ganz verhindern. Es kommt hinzu, daß das Gut ständig der Witterung ausgesetzt ist und dessen Feuchtigkeitsgehalt somit innerhalb weiter Grenzen schwankt, was von erheblichem Einflusse auf die Weiterverarbeitung ist.

12 Zweck der Untersuchungen

Nach dem Gesagten muß es Zweck dieser Untersuchungen sein, ein Verfahren zu finden, das - unter Beachtung wirtschaftlicher Gesichtspunkte - den Abbrand des Kohlenstoff-Restgehaltes aus den Rückständen der Ölschieferverschmelzung - im folgenden stets Schwelkoks genannt - in kontrollierbarer und somit auch reproduzierbarer Weise ermöglicht. Ebenfalls aus wirtschaftlichen Gründen sollen dabei Eingriffe in vor- oder nachgeschaltete Verfahrensstufen vermieden werden.

Für die gestellte Aufgabe bieten sich an:

die Verbrennung

121 im Flugstaubverfahren,
wobei der Feststoff - hier der Schwelkoks - in feiner Körnung im Trärgasstrom suspendiert und von diesem durch die Reaktionsapparatur gefördert wird. Dabei ist die Geschwindigkeit des Feststoffes nur geringfügig - um die "Schlupfgeschwindigkeit" - kleiner als die des Trärgasstromes, es ergeben sich also kurze Verweilzeiten im Reaktionsraum. Hohe Wärmeübergangszahlen werden durch direkten Kontakt zwischen Apparatewand und den einzelnen Feststoffpartikeln erzielt, siehe 42;

und

122 im Wirbelschichtverfahren.
Bei diesem wird eine Feststoffschicht vom Trärgasstrom aufgelockert und in wirbelnde Bewegung versetzt, ohne daß die einzelnen Partikel von diesem mitgenommen werden. Die Wärme aus dem Inneren der Wirbelschicht kann nicht - wie bei 121 - direkt an die Apparatewand abgegeben werden, die Wärmeübergangszahlen sind also wesentlich niedriger, und es resultiert eine höhere Verweilzeit.

Beide Verfahren werden auf eine möglichst einheitliche Charge des Schwelkokes angewandt. Damit ist es möglich, die Ergebnisse einander direkt vergleichbar gegenüberzustellen und die Bedingungen zu diskutieren,

unter denen beide Verfahren einzeln oder auch kombiniert in technischem Maßstabe angewendet werden können.

13 Fließschema

Für die durchzuführende Reaktion ergibt sich das folgende allgemeine Fließschema:

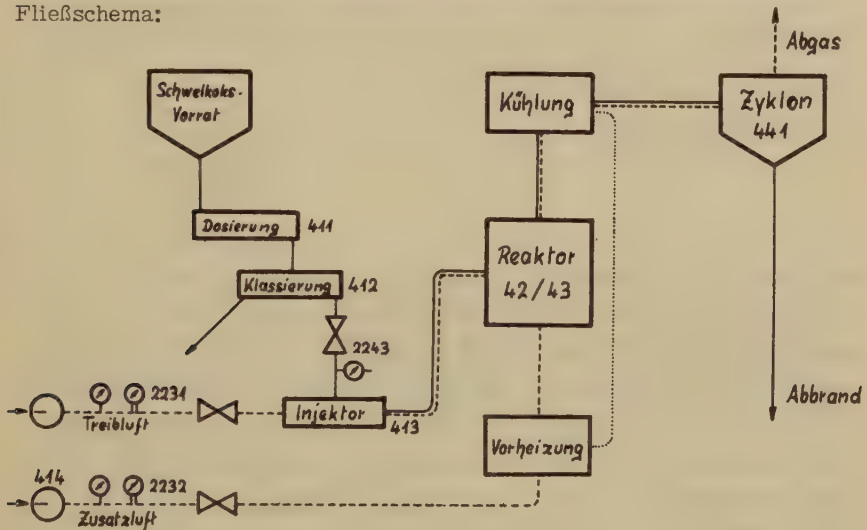


Bild 131 : Fließschema

Erläuterung der Symbole siehe 812; die Zahlen bezeichnen die Abschnitte, in denen die betreffenden Vorrichtungen beschrieben sind.

Die Veränderungen die sich durch die Verwendung des Reaktors 42 oder 43 jeweils ergeben, sind in den betreffenden Abschnitten dargestellt.

14 Begriffsbestimmung

Für das jeweils vorliegende Material werden stets folgende Bezeichnungen gebraucht:

Haldenschlacke für die teilweise gesinterte oder auch geschmolzene, von der Halde abgeräumte Asche - siehe 11 - ;

- Schwelkoks für den Rückstand des Schwelprozesses - siehe 12 - ;
- Abbrand für die Asche, die mit Hilfe der in dieser Arbeit untersuchten Verfahren gewonnen wurde;
- Produkt bzw. Gut als Oberbegriff für Schwelkoks oder Abbrand, ohne Rücksicht auf den Verarbeitungsgrad;
- Enderzeugnis für die mit Abbrand als Zuschlagstoff hergestellten Gasbetonsteine.

2 Meßwerte

20 allgemeine Kriterien

Wie bereits im vorhergehenden Abschnitt geschildert, sollen die vorliegenden Untersuchungen die Grundlagen für Betriebsdaten ergeben, die eine Übersetzung des Prozesses in den technischen Maßstab gestatten. Dabei ist zu berücksichtigen, daß sowohl die Eigenschaften des Schwelkokes in gewissen Grenzen schwanken, wie auch für die des Abbrandes Toleranzen zugelassen sind. Für die Meßwerte ist daher lediglich Betriebsgenauigkeit zu fordern, auf Präzisionsmessungen wird in allen Fällen verzichtet.

Unter diesem Gesichtspunkt werden sowohl die Meßinstrumente ausgewählt wie auch die Meßstellen angeordnet.

21 Meßwerte am Produkt

211 Glühverlust

Die gleichen Erwägungen gelten auch für die Charakterisierung des Produktes. Da der in Aussicht genommene Verfahrensschritt lediglich eine Verbrennung des Kohlenstoffgehaltes im Schwelkoks bewirken soll, wobei der Aschenanteil keine Veränderung erfährt, ist das Produkt in dieser Hinsicht mit der Angabe des Kohlenstoffgehaltes hinreichend gekennzeichnet.

Der Kohlenstoff liegt im Schwelkoks fein verteilt in außerordentlich reaktionsfähiger Form vor; er kann in einfacher Weise dadurch quantitativ bestimmt werden, daß die Analysenprobe (in einer Menge von etwa 300 mg) unter Luftzutritt 20 Min. lang im Ofen auf eine Temperatur von $840 \pm 20^{\circ}\text{C}$ erhitzt wird. Der auftretende Gewichtsverlust entspricht dem Kohlenstoffgehalt; eine Zersetzung von evtl. vorhandenem CaCO_3 ist unter diesen Bedingungen vernachlässigbar.

Um alle Ergebnisse direkt miteinander vergleichen zu können, werden sie ohne Ausnahme auf die Basis von 84% Aschegehalt für vollständig ausgebranntes Produkt bezogen.

212 Siebanalyse ⁴⁾...⁹⁾

Die Korngrößenverteilung des Produktes wird durch das eigentliche Verfahren nicht wesentlich verändert. Sie ist jedoch von Bedeutung für verschiedene Parameter des Verfahrens wie z.B. Luftgeschwindigkeit und Verweilzeit; außerdem läßt sich die Wirksamkeit der Abscheidevorrichtung 441 mit ihrer Hilfe erkennen.

Sie wird bestimmt durch Siebanalyse nach DIN 1171, im Anfang der Untersuchungen mit Hilfe einer Planprüfsiebmaschine, dann mit einem Luftstrahlsieb.

Um die damit erzielbare größere Genauigkeit der Analysenwerte verständlich zu machen, sei die Arbeitsweise beider Siebverfahren kurz beschrieben:

Bei dem Planprüfsieb kommt die Siebwirkung dadurch zustande, daß die auf der Siebfläche aufliegenden Teilchen dem Schwerfeld ausgesetzt sind, so daß diejenigen Teilchen, deren Durchmesser kleiner ist als der der Sieböffnungen, durch diese hindurchfallen. Ein beträchtlicher Anteil an Feinkorn verharret jedoch oberhalb der Siebfläche, denn der Schwerkraft wirken entgegen Haft- und Reibungskräfte sowohl zwischen den Teilchen untereinander wie auch zwischen diesen und dem Siebgewebe. Diese, die beabsichtigte Abtrennung des Feinanteiles störenden Kräfte wirken sich naturgemäß im Bereiche kleiner Teilchenabmessungen, unter 60μ ,

besonders stark aus; sie können auch durch eine von der Siebmaschine hervorgerufene rüttelnde Bewegung nur teilweise ausgeschaltet werden. Unter günstigen Bedingungen werden Siebgütegrade - diese geben das Verhältnis von tatsächlich abgeseibtem zu insgesamt vorhandenem Feinanteil an - von 85% erzielt.

Bei dem Luftstrahlsiebe wird die Wirkung des Schwerfeldes ganz wesentlich verstärkt durch einen Luftstrom, der gleichmäßig von oben nach unten durch Partikelschüttung und Siebgewebe gesaugt wird. Die Schüttung wird nachhaltig aufgelockert von einem Luftstrahl, der sie in umgekehrter Richtung, von unten nach oben, durchsetzt. Dieser Luftstrahl tritt aus einer schmalen, unter dem Siebgewebe radial angeordneten Schlitzdüse aus, die sich langsam um den Mittelpunkt der Siebfläche dreht und somit nacheinander jeden Punkt der gesamten Fläche bestreicht. Mit dieser Anordnung werden Siebgütegrade von 95% erreicht.

Für das vorliegende Produkt ist die Siebanalyse nur bedingt brauchbar; es enthält einen hohen Anteil an Feinkorn $< 60 \mu$, der an der unteren Grenze des durch Siebanalyse überhaupt noch Bestimmbaren liegt und mit den zur Verfügung stehenden Einrichtungen nicht in hinreichend enge Fraktionen aufgeteilt werden kann. Es kann jedoch nicht auf sie verzichtet werden, da seitens des Weiterverarbeiters eine bestimmte Korngrößenverteilung - und speziell ein Gehalt an Feinkorn $< 60 \mu$ - als wesentliche Spezifikation für den Abbrand gefordert wird.

213 spezifische Oberfläche $^{10)} \dots ^{12)}$

Zwischen der Korngrößenverteilung des Abbrandes und den Güteeigenschaften des daraus hergestellten Bausteines besteht kein eindeutiger Zusammenhang. Es wird daher zusätzlich die spezifische Oberfläche des Abbrandes bestimmt, und zwar mit Hilfe der Methode nach Blaine. Da die Meßwerte im untersuchten Bereiche eine Funktion der Packungsdichte sind, werden sie einheitlich auf einen Hohlraumanteil von 0,69 bezogen. Die Genauigkeit beträgt $\pm 4\%$.

Als Eichsubstanz dient eine aus dem bisher üblichen Rohstoff - Halden-

schlacke - gewonnene Durchschnittsprobe, deren Wert für die spezifische Oberfläche gleich 1,00 gesetzt wird. Eine Angabe von Absolutwerten, zu deren Ermittlung andere, z.B. Adsorptionsverfahren, herangezogen werden müßten, erübrigt sich; die Gütezahl der erzeugten Gasbetonsteine läßt sich, wie unter 63 gezeigt werden wird, eindeutig als Funktion der relativen spezifischen Oberfläche darstellen.

22 Meßwerte im Reaktionsablauf

221 Temperatur ¹³⁾...¹⁵⁾

Sämtliche angegebenen Temperaturen werden gemessen mit Hilfe von Ni/CrNi-Thermoelementen ohne Kompensation, wobei die Temperatur der Vergleichsstellen $20 \pm 5^{\circ}\text{C}$ beträgt; dieser Wert ist in das Anzeigeelement eingeeicht.

Der absolute Meßfehler beträgt $\pm 20^{\circ}$.

Die Lage der Temperaturmeßstellen wird unter 42 bzw. 43 angegeben.

222 Produktdurchsatz

Der Produktdurchsatz wird ermittelt aus der gesamten, während eines Versuches verbrauchten Menge.

Die Gewichtskonstanz des eingespeisten Schwelkoksstromes wird kontinuierlich überwacht, und zwar indirekt mit Hilfe der Reaktionstemperatur. Die Wärmekapazität der Reaktoren ist so gering gehalten, daß eine Änderung der in der Zeiteinheit zugeführten Schwelkoksmenge mit einer Verzögerung von weniger als einer Minute eine entsprechende, definierte Temperaturänderung bewirkt.

Das folgende Diagramm 2221 gibt die Abhängigkeit der Reaktionstemperatur von der Schwelkoksmenge unter festgelegten Reaktionsbedingungen - Versuch Nr. 19 - wieder. Danach ergibt sich - bei einer Temperaturkonstanz von $\pm 15^{\circ}$ - für die Gewichtskonstanz der Einspeisung ein Streubereich von $\pm 3\%$.

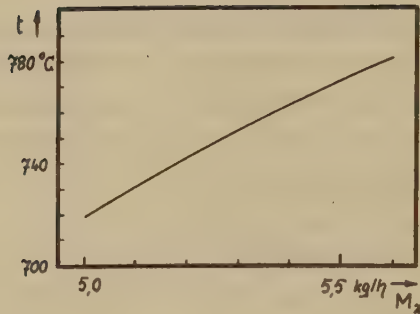


Diagramm 2221: Abhängigkeit der Reaktionstemperatur vom Koksdurchsatz

223 Luftdurchsatz

Die durchgesetzte Luft hat in allen Fällen mehrere Funktionen zu erfüllen; der darin enthaltene Sauerstoff ist Reaktionspartner für den Kohlenstoff des Schwelkoks, und das durchströmende Gesamt-Gasvolumen dient als Trägergas für den Feststoffdurchlauf bzw. die Wirbelschicht.

Ein Teilstrom ist ferner erforderlich, um den Schwelkoks gegen den in der Apparatur herrschenden Überdruck in diese hinein zu fördern. Dieser Teilstrom wird als Treibluft bezeichnet; seine Menge hängt ab von dem - mit den Betriebsbedingungen wechselnden - Druckabfall in der Apparatur. Er wird durch einen zweiten Teilstrom, dessen Menge frei wählbar ist, auf die jeweils erforderliche Gesamtluftmenge ergänzt; dieser zweite Teilstrom wird als Zusatzluft bezeichnet.

2231 Treibluft

Die Treibluftmenge wird kontinuierlich mittels eines Durchflußmengenmessers nach dem Schwebekörperprinzip gemessen, der - bei festgelegtem Betriebsdruck - unmittelbar in Normalvolumina pro Zeiteinheit geeicht ist. Die Genauigkeit beträgt $\pm 2\%$.

2232 Zusatzluft

Die Zusatzluftmenge wird ebenfalls kontinuierlich gemessen, und zwar nach DIN 1952 mit Hilfe von in die Zufuhrleitungen eingebauten Meßblenden, deren Wirkdruck zunächst mittels eines Differenzdruckmanometers und später von einem Schwimmer-Anzeige- und Schreibgerät erfaßt wird. Infolge der quadratischen Abhängigkeit ist die Meßgenauigkeit nicht in allen Bereichen gleich; sie beträgt im hauptsächlich benutzten Bereiche $\pm 2\%$.

Die Meßwerte sind angegeben im Normzustand technischer Gase, 20°C , 1 ata; für das Differenzdruckmanometer wurde ein Nomogramm entworfen ¹⁶⁾, das aus dem Wirkdruck und dem Absolutdruck an der Meßstelle das entsprechende Normalvolumen abzulesen gestattet. Auf zusätzlichen Leitern sind aufgetragen sowohl die zugehörige Schweißkoksmenge, die - bei einem Kohlenstoffgehalt von 16% - einem vollständigen Umsatz zu CO_2 mit der jeweiligen Luftmenge entspricht, wie auch - unter Berücksichtigung der Betriebstemperatur - das Gasvolumen und die lineare Gasgeschwindigkeit im Reaktor unter Betriebsbedingungen. Abbildung des Nomogrammes siehe Seite 14.

224 Hilfsgrößen

2241/2 Heizgas/Heizluft

Zur Anzeige des zur Beheizung des Wirbelrohres erforderlichen Flüssiggas-Luft-Gemisches werden Kapillarrohr-Differenzdruckmanometer verwendet. Diese wurden eudiometrisch bzw. im oberen Bereiche mit Hilfe einer Gasuhr geeicht. Die Genauigkeit beträgt $\pm 2\%$.

2243 Druckabfall vor der Einspeisedüse

Insbesondere bei den Versuchen im Wirbelrohr schwankt der Druckabfall innerhalb der Apparatur sehr stark; da jedoch im Interesse einer möglichst hohen Verweilzeit stets mit einem Minimum an Treibluft gefahren werden soll, muß die einwandfreie Funktion des Injektors 413 ständig

Leiter Nr.

1

2

3 4

5

6 7

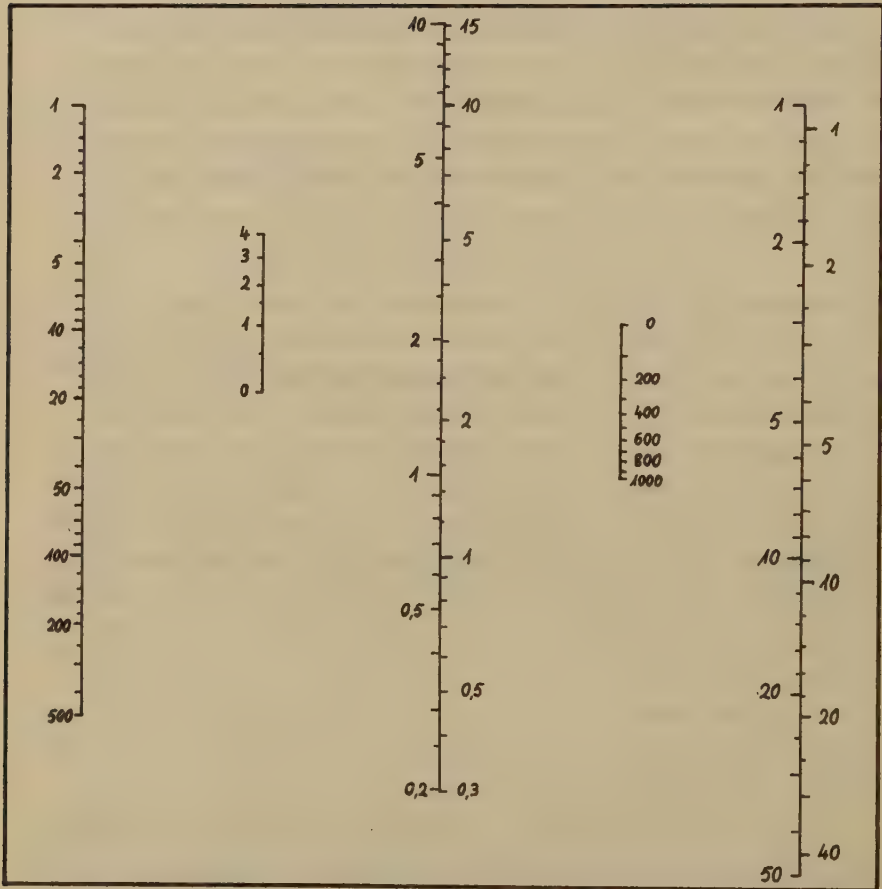


Diagramm 2232: Nomogramm zum Luftdurchsatz

Leiter 1: Wirkdruck

mm H₂O

" 2: Gesamtdruck

atü

" 3: Schwelkoksmenge, stöchiom. zu CO₂ umsetzbar

kg/h

" 4: Luftmenge

nm³/h

" 5: Betriebstemperatur

°C

" 6: Luftmenge

m³/h

" 7: lineare Luftgeschwindigkeit

m/sec.

überwacht werden. Das geschieht dadurch, daß der Querschnitt der Produkt-Falleitung vor dem Injektor in gleicher Weise wie in diesem verengt und der an dieser Stelle gegen die Atmosphäre erzeugte Druckabfall gemessen wird. Dieser ist zwar in hohem Maße von der Menge geförderten Gutes abhängig, es lassen sich jedoch rasch die für einen störungsfreien Betrieb auch unter veränderlichen Bedingungen erforderlichen Erfahrungswerte gewinnen.

2244 Druckabfall in der Wirbelschicht

Der Gesamt-Druckverlust in einem Wirbelschichtreaktor setzt sich in bekannter Weise ¹⁷⁾ additiv aus den Einzelwerten für Filterboden und eigentliche Wirbelschicht zusammen. Der Druckverlust im Filterboden ist eine eindeutige Funktion der Strömungsgeschwindigkeit eines gegebenen Trägergases, der Druckabfall in der Wirbelschicht dagegen hängt weitgehend von deren Betriebszustand ab; verändert sich dieser, z.B. infolge von Kanalbildung oder auch, indem durch Agglomeration oder Sinterung Kornvergrößerung eintritt, so stellt sich ein anderer Druckverlust in der Wirbelschicht ein, und der Gesamtdruckverlust verändert sich um den gleichen Betrag.

In dem Wirbelschichtreaktor 43 wird der Gesamtdruckverlust zwischen Eingang und Ausgang des Reaktors gemessen und damit der Betriebszustand der Wirbelschicht zuverlässig überwacht.

225 Gasanalyse

Zur Kontrolle der Stoff- und Energiebilanz ¹⁸⁾ werden aus dem aus der Wirbelschicht abziehenden Gase Proben gezogen und durch Absorption in der Bürette nach Bunte bestimmt. Es werden gemessen CO_2 in KOH , O_2 in $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4/\text{NaOH}$ sowie CO in $\text{Cu}_2\text{Cl}_2/\text{NH}_4\text{OH}$ ¹⁹⁾.

23 Meßwerte am Enderzeugnis

Der aus dem Wirbelschichtreaktor in genügender Menge - 4 kg für eine Probe - gewonnene Abbrand wird im Labor des Weiterverarbeiters nach einer gängigen Rezeptur zur Herstellung von Gasbetonsteinen verwandt. Die Steine werden unter gleichen Bedingungen wie die der laufenden Produktion - siehe 62 - gehärtet und anschließend auf Druckfestigkeit und Raumgewicht geprüft; aus diesen Werten wird sodann eine Gütezahl ermittelt; diese wird bezogen auf einen aus Rohstoffen der laufenden Produktion hergestellten Stein, dessen Gütezahl gleich 100 gesetzt wird.

3 Produkt

31 Spezifikationen

Seitens des Weiterverarbeiters wird für den Abbrand ein Kohlenstoffgehalt $\leq 3\%$ und eine Kornzusammensetzung mit mehr als 70% Feinkornanteil $\leq 60 \mu$ gefordert, wobei nach Möglichkeit eine Kornverteilung anzustreben sei, die etwa folgenden, aus dem Mittel der Siebanalysen derzeit eingesetzter Haldenschlacke gewonnenen Werten entspreche:

Teilchendurchmesser	Rückstandssumme
> 0,5 mm	1,0 %
> 0,25	2,5
> 0,12	5,0
> 0,09	17,0
> 0,06	30,0

Die in der rechten Spalte - Rückstandssumme - stehenden Werte stellen jeweils die gesamte Menge des auf dem betreffenden Siebe verbleibenden Rückstandes dar; der abgesiebte Feinanteil ist somit stets die Differenz dieses Betrages zu 100%.

32 Vorbereitung des Produktes

Der den Schmelofen verlassende Rückstand fällt in stückiger Form an und ist unmittelbar in keinem der beiden in Aussicht genommenen Reaktoren einsetzbar. Er muß daher weiter zerkleinert werden.

Das Flugstaubverfahren kann Teilchengrößen zwischen 0 und 0,25 mm Durchmesser verarbeiten ²⁰⁾, während für das Wirbelschichtverfahren die Grenzen zwischen 0 und 10 mm liegen ²¹⁾, ²²⁾.

Es erweist sich daher als zweckmäßig, das Produkt gleich so fein zu mahlen, daß es den in 31 angeführten Spezifikationen entspricht. Es kann dann in beiden Apparaturen gleichermaßen eingesetzt werden, die gewonnenen Daten sind miteinander direkt vergleichbar, und eine weitere Feinmahlung nach der Verarbeitung erübrigt sich.

Das gemahlene Produkt hat folgende Kornzusammensetzung:

Teilchendurchmesser	Rückstandssumme
> 0,5 mm	0,5 %
> 0,25	2,5
> 0,12	16,5
> 0,09 ⁵	27,5
> 0,06	40,0

Beide Kornspektren, sowohl das nach 31 wie auch das nach 32, repräsentieren nahezu eine logarithmische Normalverteilung, wie das nach Art ihrer Herstellung (Kugelmühle mit Windsichtung) durchaus zu erwarten ist. Die Kornspektren sind im folgenden Diagramm 321 dargestellt; die Ordinatenteilung ist so gewählt, daß die Meßpunkte beim Vorliegen einer logarithmischen Normalverteilung auf einer Geraden liegen.

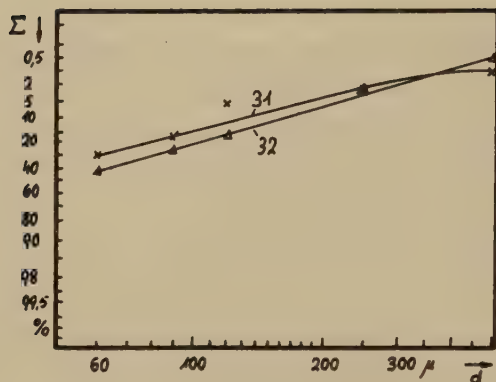


Diagramm 321: Kornverteilung des Produktes; Sollkurve - 31
Istkurve - 32 .

33 Vorprüfung auf Reaktionsfähigkeit

331 Glühverlust

Der wie beschrieben feingemahlene Schwelkoks wird in frischer, lockerer Schüttung im elektrischen Ofen erhitzt, wobei die Schicht nicht umgewälzt wird; es werden Verweilzeit, Temperatur und Schichthöhe variiert und die Abhängigkeit des Glühverlustes von diesen Parametern gemessen. Die hieraus gewonnenen Erkenntnisse gestatten es, die Reaktionsfähigkeit des Schwelkokes abzuschätzen und danach überschlägig die Betriebsdaten der Reaktoren zu bestimmen.

Wie sich aus dem folgenden Diagramm 3311 ersehen läßt, ist es unzweckmäßig, Temperatur und Verweilzeit über einen gewissen Betrag hinaus - etwa durch den Punkt O gekennzeichnet - zu erhöhen; der dadurch erzielbare weitere Umsatz steht in keinem tragbaren Verhältnis zum erforderlichen Mehraufwand.

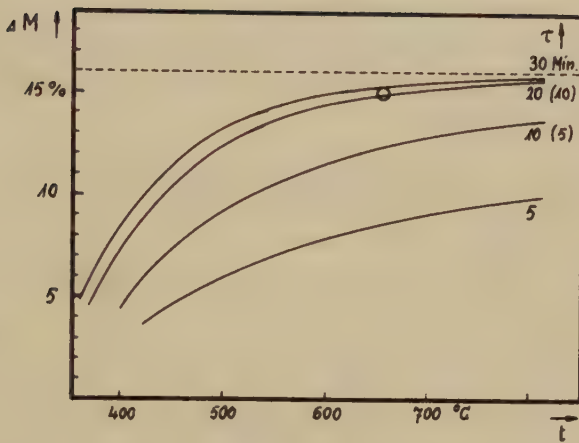


Diagramm 3311: Glühverlust des Schmelkokses

Das Diagramm gilt für eine Schichthöhe von 10 mm; wird diese auf 5 mm verringert, so gilt der in Klammern angegebene Wert für die Verweilzeit. Für bewegtes Gut ist noch eine wesentliche Verstärkung dieses Effektes zu erwarten.

332 Sintergrenze

In gleicher Weise wird das Temperaturgebiet bestimmt, in dem die Ascheteilchen zu sintern beginnen; es liegt bei 1000°C und stellt die absolute Obergrenze für die Reaktionstemperatur dar. Bei bewegtem Gute ist die Gefahr der Agglomeration bedeutend größer, und es ist erforderlich, einen entsprechenden Sicherheitsabstand von dieser Temperaturgrenze einzuhalten.

Die Größe dieses Sicherheitsabstandes ist durch Verfahrensweise und Apparatedaten gegeben; sie beträgt für das Wirbelrohr 100° und für den Wirbelschichtofen - wegen dessen breiterer Temperaturverteilung - 250°, so daß sich maximale Betriebstemperaturen von 900 bzw. 750°C ergeben.

Die Aufheizgeschwindigkeit einer Wirbelschicht ist der Anstieg der mittleren Temperatur in der Zeiteinheit, der sich bei Zufuhr eines zeitlich konstanten Wärmestromes - unter Versuchsbedingungen $10^4 \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{h}$ - an die Wirbelschicht einstellt.

Er resultiert primär aus dem Wärmeübergang von der Heizfläche an das Wirbelgut und zeigt erwartungsgemäß einen Verlauf, der sich asymptotisch einem Gleichgewichtswert - hier ca. 450°C - annähert, wie Kurve 1 des Diagrammes 3331 zeigt. Beim Versuchsreaktor ist die Apparatewand Heizfläche, siehe Zeichnung 433.

Bei kohlenstoffhaltigem Wirbelgut ist ein grundsätzlich anderer Verlauf des Temperaturanstieges zu beobachten - Kurven 2 und 3 des Diagrammes - ; hier setzt nach einer gewissen Induktionszeit ^{x)} die Verbrennung des Kohlenstoffes ein und bewirkt infolge der freiwerdenden Reaktionswärme einen wesentlich steileren Kurvenverlauf. Es zeigt sich - Kurve 3 - , daß bereits bei einer mittleren Temperatur von ca. 60°C - Wendepunkt der Kurve - die Reaktion eingesetzt hat. Das bedeutet, daß der Kohlenstoff im Schwelkoks in außerordentlich reaktionsfreudiger Form vorliegt; trotz des extrem hohen Aschegehaltes von 84% kann der Schwelkoks daher im Hinblick auf die erforderliche Verweilzeit im Reaktionsraum einer Staubkohle gleichgesetzt werden, und das Wirbelrohr wird anhand des Diagrammes 3332 "Brennzeiten in Kohlenstaubfeuerungen" - nach ²³⁾ - projektiert.

Es wird dabei bewußt außer acht gelassen, daß der Schwelkoks - im Gegensatz zu den dem Diagramm 3332 zugrundegelegten Brennstoffen - nicht als kompaktes Kohleteilchen entsprechender Körnung vorliegt. Der Kohlenstoff ist vielmehr in noch wesentlich feinerer Form über den - gewisser-

^{x)} Wird ein reaktionsfähiges Gemisch in den reaktionsbereiten Zustand versetzt, z.B. durch Erhitzen auf Reaktionstemperatur, so vergeht eine bestimmte Zeitspanne, deren Dauer von den Eigenschaften des Reaktionsgemisches abhängt, bevor die Reaktion einsetzt. Diese Zeitspanne ist die Induktionszeit; sie wird kürzer sowohl mit steigender Temperatur wie auch mit steigendem C-Gehalt des Schwelkokes. Kurze Induktionszeit ist gleichbedeutend mit großer Zündwilligkeit.

maßen als Träger wirkenden - Aschenanteil verteilt und daher vor allem an der Oberfläche reaktionsfreudiger. Im Inneren des Kornes wird dagegen die Verbrennung des Kohlenstoffes stark verzögert werden, da durch die Ascheschichten Sauerstoffzutritt und Wärmeübertragung gehemmt werden.

Im Hinblick auf die Weiterverwendung des Abbrandes ist es vor allem wesentlich, den an der Kornoberfläche liegenden Kohlenstoff zu entfernen.

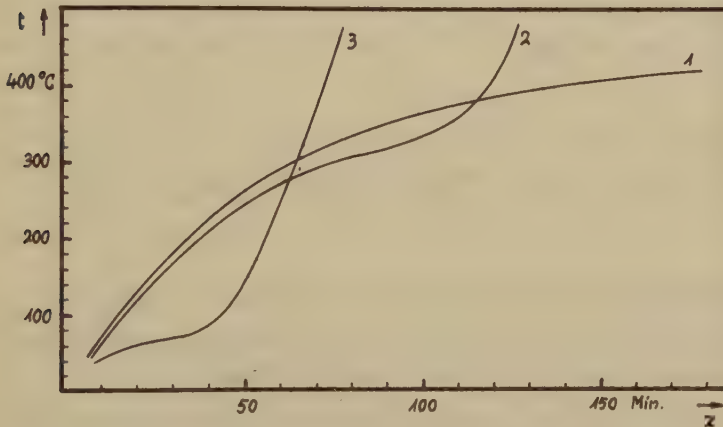


Diagramm 3331: Aufheizgeschwindigkeit der Wirbelschicht

Kurve 1: Wirbelgut mit 0 % Kohlenstoff

" 2: " " 6 % "

" 3: " " 16 % "

Der im Anfangsbereich vor allem bei Kurve 3 wesentlich geringere Anstieg der Temperatur ist darauf zurückzuführen, daß bei einem Kohlenstoffgehalt von 16% die Oberfläche der einzelnen Schwelkokspartikel vollkommen von Kohlenstoff bedeckt ist, dessen Wärmeleitzahl etwa um den Faktor 2 niedriger und dessen spezifische Wärme geringfügig - etwa um den Faktor 1,2 - höher ist als die entsprechenden Werte des Aschenanteiles. Bei teilweise abgebranntem Gute, wie es durch die Kurve 2 dargestellt wird liegt der Kohlenstoff in der Hauptsache in Form von Einsprengungen in den Körnern vor, so daß hier der Wärmetransport in der

Hauptsache vom Aschenanteil übernommen wird, was in einer weitgehenden Angleichung an die Kurve 1 zum Ausdruck kommt.

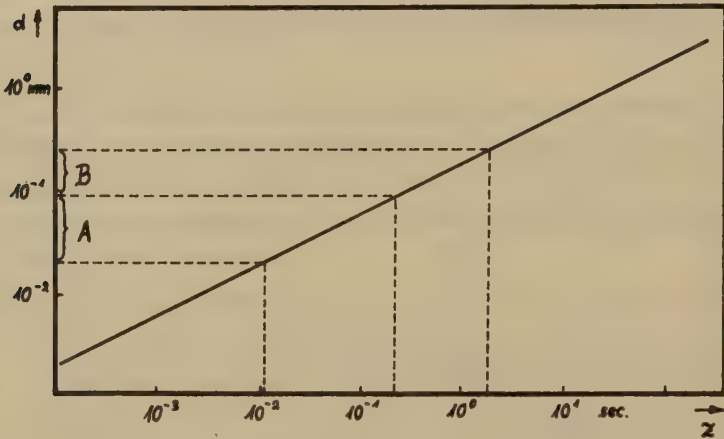


Diagramm 3332: Brennzeiten in Kohlenstaubfeuerungen - nach ²³⁾ -

Der Bereich A mit Brennzeiten bis zu 2 Zehntelsekunden umfaßt 72,5% des Schwelkokses, und der Bereich B gilt für weitere 27,0%.

Wie aus dem Diagramm ersichtlich, ist es im Interesse einer hohen Raum-Zeit-Ausbeute zweckmäßig, die Verweilzeit so zu bemessen, daß der Anteil A vollständig abreagiert. Das den Reaktor verlassende Gut wird durch Windsichtung getrennt und der noch Unverbranntes enthaltende Grobanteil in einem nachgeschalteten Reaktor mit höherer Verweilzeit vollständig ausgebrannt.

4 Apparatur

Die in den Abschnitten 41 und 441 aufgeführten Hilfsvorrichtungen werden sowohl für den Reaktor 42 wie auch 43 unverändert benutzt.

41 Einspeisung

Für die Einspeisung des Schwelkokses in die Reaktoren stehen prinzipiell mehrere verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Es muß jedoch von vorneherein ausscheiden eine Naßeinspeisung gleich welcher Art, da eine solche in jedem Falle - auch bei Verwendung von Kohlenwasserstoffen als flüssiger Phase - eine Entwicklung von Wasserdampf im Reaktor bewirkt. Die Apparatur muß jedoch aus räumlichen Gründen mit langen, nicht heizbaren Abgasleitungen versehen werden, und bei einer Unterschreitung des Wasserdampf-Taupunktes würde die im Abgas enthaltene Asche zusammen mit der sich niederschlagenden Feuchtigkeit diese Leitungen in kurzer Zeit versetzen.

Es wird daher eine Preßluft-Trockeneinspeisung gewählt, die unter 413 beschrieben ist.

411 Dosierung

Es ist unerlässlich, den Zulauf des Schwelkokses auf $\pm 3\%$ konstant zu halten; die Versuchsreaktoren haben eine außerordentlich geringe Wärmekapazität, und es sind keine Kühlvorrichtungen vorgesehen, so daß die Reaktionstemperatur lediglich eine Funktion der in der Zeiteinheit eingespeisten Schwelkoksmenge ist.

Der feingemahlene Schwelkoks ist jedoch für eine Dosierung mit der hier erforderlichen Genauigkeit in den für die Versuchsreaktoren in Frage kommenden Mengen außerordentlich schlecht geeignet. Sein Fließverhalten ist in hohem Maße vorgeschichtsabhängig; eine frische, lockere Schüttung zeigt ein quasiflüssiges Verhalten, beim Neigen des Gefäßes stellt sich mehrfach hintereinander erneut eine waagerechte Pulveroberfläche ein; nach einigem Stehen der Schüttung verfestigt sich diese jedoch unter Volumverminderung. Beim Versuche, die gealterte Schüttung aus dem Gefäße auszugießen, zeigt das Pulver ein ausgesprochen schießendes Verhalten, und beim Abtragen des Vorrates aus dem Einlauftrichter der verwendeten Dosier-Schüttelrinne mit Hilfe eines langsamlaufenden Rührwerkes bilden sich Böschungswinkel von über 90° aus; bei einigen Schwelkoks-

Chargen bilden sich über dem obersten Rührerflügel sogar Brücken aus und blockieren somit den Nachlauf des Gutes vollständig.

Die beschriebenen Alterungserscheinungen der Materialschüttungen treten naturgemäß besonders stark auf unter dem Einflusse von Vibrationen, die jedoch von der Apparatur nie ganz ferngehalten werden können.

Eine befriedigende Reproduzierbarkeit der Dosierung wird unter den gegebenen Umständen in der Weise erreicht, daß die träge Masse der verwendeten Dosierrinne beträchtlich - um etwa 60 kg - vergrößert, der Radius der Auslauföffnung des Vorratstrichters verkleinert, innerhalb des Vorratstrichters ein Rührwerk angeordnet und dieses mit konstanter Umdrehungsgeschwindigkeit - stroboskopisch überwacht - betrieben wird.

Im technischen Maßstabe bereitet es keine Schwierigkeiten, den Schwelkoks mit der erforderlichen Genauigkeit zu dosieren. Wird der Mengenstrom z.B. bereits vor der Mühle, also im Bereiche stückigen Gutes, auf den gewünschten Wert eingestellt, was ohne weiteres möglich ist, so treten die erwähnten Komplikationen nicht auf. Der im Anschluß an die Feinmahlung vom Windsichter abgetrennte, gleichmäßige Teilchenstrom wird dann unmittelbar in den Reaktor eingespeist, ohne daß er - durch eine Zwischenlagerung - Gelegenheit zum Zusammenballen erhält.

412 Klassierung

Der feingemahlene Schwelkoks weist noch einen Gehalt von unter 0,1% an gröberen Teilchen auf, insbesondere solchen in Blättchenform. Diese können die Einspeisung empfindlich stören und müssen daher restlos entfernt werden.

Dazu wird der Auslauf der Dosier-Schüttelrinne durch ein Sieb mit der Maschenweite 1,5 mm, Drahtstärke 0,3 mm, um 100 mm verlängert. Es verbietet sich, dieses Sieb fest an die Schüttelrinne anzukoppeln, da das Schüttgut nach dem Passieren der 400 mm langen Rinne soweit verfestigt ist, daß es zu mehr als 50% über die Oberfläche des Siebgewebes weitertransportiert wird, obwohl die Hauptkornfraktion um den Faktor 50 kleiner ist als die Sieböffnungen. Erst eine Verstimmung der Frequenz des Siebes

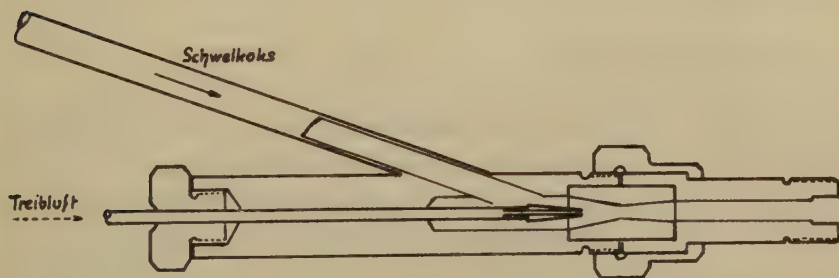
gegen die der Schüttelrinne - durch elastische Aufhängung erzielt - bewirkt einen glatten Durchlauf des Produktes durch die Sieböffnungen und darüber hinaus noch einen Abbau selbst festerer Korn-Agglomerate.

413 Injektor

Die Reaktoren stehen unter einem Überdruck, der durch den Druckverlust in der Apparatur - hauptsächlich den Abgasleitungen - bedingt ist und je nach den Betriebsbedingungen bis auf 170 Torr ansteigt; das Produkt muß - aus den unter 411 erwähnten Gründen in vollkommen gleichmäßigem Strome - gegen diesen Überdruck in die Apparatur eingespeist werden.

Den hydrostatischen Druck einer quasiflüssigen Pulverschüttungs-Säule auszunützen verbietet sich durch die bereits erwähnten sehr rasch einsetzenden Backerscheinungen; eine auf diesem Prinzip aufgebaute Einspeisevorrichtung setzt sich trotz vollkommen glatter (Glas-)Innenflächen stets innerhalb kurzer Zeit infolge von Brückenbildung zu.

Ein störungsfreier Betrieb wird möglich mit einer für diese Aufgabe eigens konstruierten Injektordüse - Zeichnung 4131 -, die mit Preßluft von 5 atü betrieben wird. Die Kennlinie des Injektors zeigt das Diagramm 4132.



Zeichnung 4131: Schwelkoks-Injektor

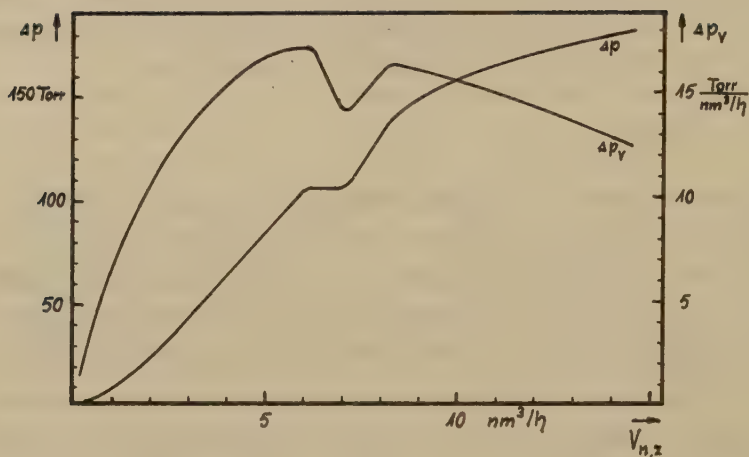


Diagramm 4132: Kennlinie des Injektors

In Bereichen hoher Belastung - hauptsächlich bei dem Reaktor 42 - wird die Treibluft auf 500°C vorgeheizt; ein Arbeiten im oberen, flachen Bereiche der Kennlinie läßt sich dennoch nicht immer vermeiden. In diesem Falle ist der Betrieb zweier hintereinandergeschalteter Injektoren günstiger.

Die Treibluft dient in den nachgeschalteten Reaktoren als ein Teil der Verbrennungsluft.

414 Luftversorgung

Zur vollständigen Verbrennung des eingesetzten Kohlenstoffes reicht die durch den Injektor in den Reaktor eintretende Treibluftmenge nicht aus, außerdem ist deren Menge nur in relativ engen Grenzen frei variierbar. Daher wird zusätzlich Brennlufft zugeführt. Diese wird von einem Wasser-ring-Kompressor geliefert; sie ist bei Raumtemperatur - die Kompressionswärme wird vom Speisewasser des Kompressors aufgenommen und abgeführt - wasserdampfgesättigt und vollkommen ölfrei. Durch die Verdünnung dieser Zusatzluft mit - trockener - Treibluft sind Schwierigkeiten der in 41 erwähnten Art ausgeschlossen, da kein Teil der Apparatur wesentlich

unter Raumtemperatur abgekühlt wird.

Ausschlaggebend für die Wahl dieses Kompressors waren seine gute Regelbarkeit und seine Laufruhe, da er direkt neben der Apparatur aufgestellt werden mußte.

Die 'Ansaugleitung des Kompressors führt ins Freie.

42 Wirbelrohr

Der Reaktor für die Versuche mit kurzer Verweilzeit ist ein langes, enges Rohr mit einem l/d-Verhältnis von 250 ($l=5000\text{mm}$, $d=20\text{mm}$) .

Zur Verbesserung des Wärmeüberganges zwischen durchlaufendem Gute und Rohrwand ist im Rohre ein spiralig gewendeltes Band - Steigung $100\text{mm}/180^\circ$ - angebracht. Dadurch werden Luft und Produkt zur Rotation gezwungen und die festen Teilchen zur Rohrwand hin auszentrifugiert; die laminare Grenzschicht wird zerrissen und so der Wärmeübergang wesentlich - bis zu einem Faktor 2 gegenüber einer nur in der Längsachse des Rohres verlaufenden Strömung - verbessert. Von besonderer Bedeutung ist bei dieser Anordnung, daß die Breite der Temperaturverteilung wesentlich herabgesetzt und damit auch die Anzahl der Teilchen mit einer höheren als der mittleren Temperatur stark verringert ist ²⁴⁾ .

Der Strahlungsanteil der Wärmeübertragung wird in analoger Weise vergrößert.

Der Reaktor wird mit Gas aufgeheizt, und zwar aus den unter 41 angeführten Gründen indirekt. Die Abgase eines für diesen Zweck entworfenen Brenners umströmen in einem Mantelrohr den eigentlichen Reaktor; der Brenner wird mit größtmöglichem Luftüberschuß gefahren, um die benötigte Wärmemenge bei möglichst kleinem Temperaturunterschied übertragen zu können und so lokale Überhitzungen zu vermeiden.

In der aus Zuluftleitung, Brennerkammer, Heizzone und Abgasleitung gebildeten Gassäule treten im Betriebe Schwingungen auf, die sich rasch aufschaukeln und den Brenner nach kurzer Zeit zum Verlöschen bringen. Es ist erforderlich, diese Gassäule an irgendeiner Stelle - eine Anordnung direkt vor dem Brenner hat sich bewährt - durch eine in der Rohrleitung

angeordnete Füllkörperschicht zu unterbrechen und auf diese Art die auftretenden Schwingungen zu dämpfen. Damit wird ein störungsfreier Betrieb der Gasbrenner ermöglicht.

Der Reaktor trägt auf seiner Außenseite - innerhalb des Mantelraumes - aufgeschweißte Taschen zur Aufnahme der Thermoelemente. Diese Thermoelemente werden noch etwa 200 mm innerhalb des Mantelraumes geführt, bevor sie diesen durch ebenfalls etwa 200 mm lange, angeschweißte Rohrstutzen verlassen. Damit wird eine Verfälschung der Temperaturmeßwerte, die durch Wärmeableitung entlang der Thermoelemente hervorgerufen wird, auf ein Mindestmaß herabgesetzt.

Auf dem Reaktor sind in regelmäßigen Abständen Stauscheiben angebracht, an denen das Heizgas zur Verbesserung des Wärmeüberganges intensiv verwirbelt wird.

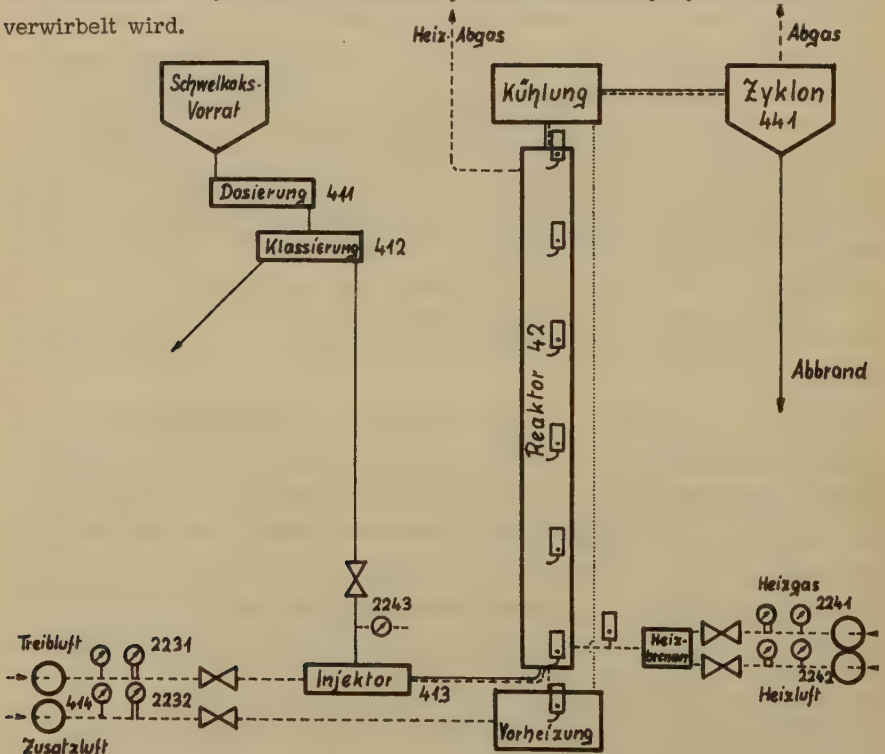


Bild 421 : Fließschema zum Wirbelrohr

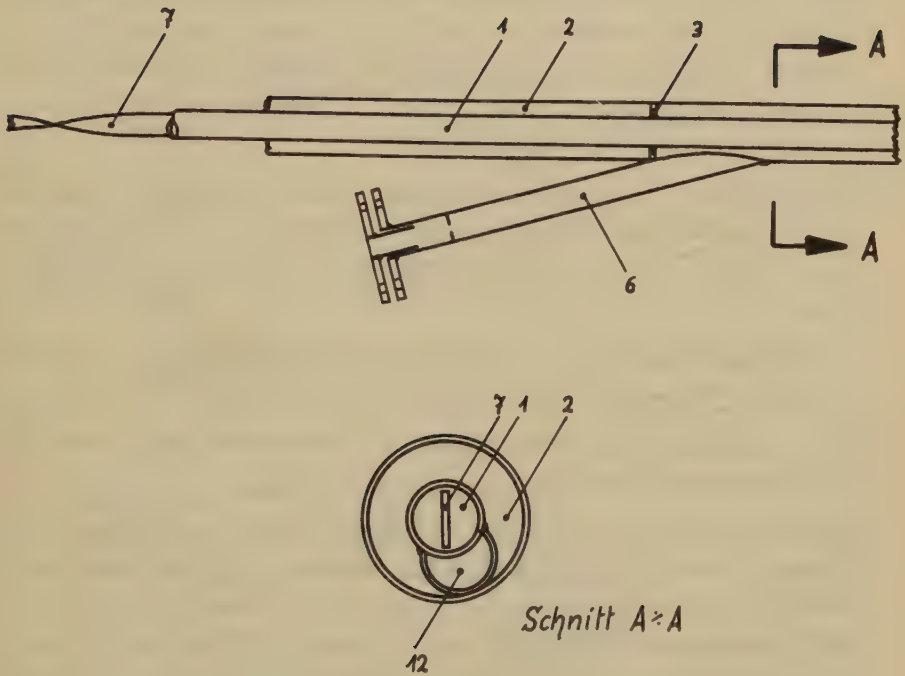


Bild 422 : Wirbelrohr

- 1 Wirbelrohr, Reaktionsraum
- 2 Mantelraum
- 3 Stauscheiben (nur eine gezeichnet)
- 6 Ansatzstutzen für Thermoelement
- 7 Drallblech
- 12 Tasche für Thermoelement

43 Wirbelschichtreaktor

Der Reaktor für die Versuche mit langer Verweilzeit ist ein Wirbelschichtofen von zylindrischem Querschnitt mit einem l/d -Verhältnis von 1 ($l=d=200\text{mm}$).

Die Verbrennungsluft wird von unten in der Zylinderachse eingeblasen, kann unterhalb des Wirbelschichtbodens vorgeheizt werden und passiert

dann oberhalb eines $10\,000$ - Maschen/cm² - Siebes die eigentliche Wirbelschicht. In einer ebenfalls zylinderförmigen Kammer über der Wirbelschicht - $d = 400$ mm - wird der Luftstrom verzögert, damit ein möglichst großer Anteil an mitgerissenem Feststoff sedimentiert und nicht in die seitlich angeordnete Abgasleitung eintritt.

Der Schwelkoks wird durch eine ebenfalls seitlich angeordnete Falleitung, die 50 mm über dem Siebboden endet, eingespeist, und der Abbrand verläßt die Wirbelschicht durch einen Überlauf auf der gegenüberliegenden Seite.

Schaugläser gestatten es, das ordnungsgemäße Funktionieren des Materialflusses zu überwachen.

Die Temperatur in der Wirbelschicht wird 50 mm über dem Siebboden in der Zylinderachse gemessen.

Der Reaktormantel ist mit einer elektrischen Heizung ausgestattet; deren Leistung beträgt 2,8 kW. Sie dient zum Aufheizen des Wirbelgutes beim Anfahren der Reaktion und ist so ausgelegt, daß dieser Vorgang bei frischem Schwelkoks ohne Schwierigkeiten abläuft - Diagramm 431 - . Ausgebranntes Wirbelgut läßt sich sehr viel schwerer aufheizen - Diagramm 3331 - , es wird daher nach beendeter Reaktion mittels eines dicht über dem Siebboden angebrachten Auslaufes größtenteils aus dem Reaktor entfernt und durch frischen Schwelkoks ersetzt.

Die nach dem Einsetzen der Verbrennung im Versuchsreaktor auftretende Temperaturspitze - siehe Diagramm 431 - läßt sich ohne Mühe beherrschen. Unter Versuchsbedingungen wird die freiwerdende Wärmemenge vom Trägergas sowie vom Aschenanteil des Wirbelgutes aufgenommen, ohne daß es zu einer Temperatursteigerung bis zur Sintergrenze kommt.

Im technischen Maßstabe kann diese Temperaturspitze ohne weiteres wesentlich abgeflacht werden, indem z.B. der Kohlenstoffgehalt des Schwelkokes durch Beimischen von Abbrand auf einen geeigneten niedrigen, mittleren Wert eingestellt wird; die dadurch notwendig werdende Erhöhung der Vorheizleistung ist nur von untergeordneter Bedeutung, da diese nur während der - gegenüber der Gesamtbetriebsdauer des Reaktors nicht ins

Gewicht fallenden - Anfahrperiode aufgebracht werden muß.

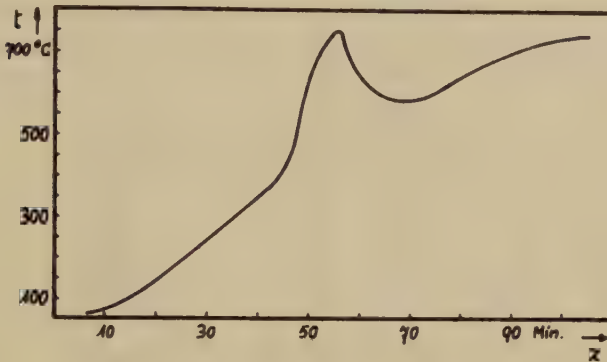


Diagramm 431: Temperaturverlauf beim Anfahren des Reaktors

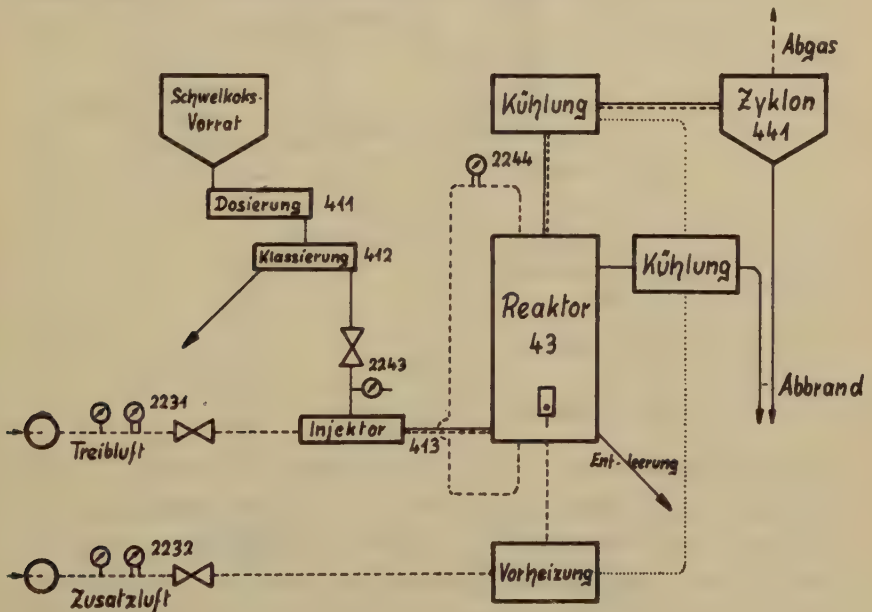


Bild 432: Fließschema zum Wirbelschichtreaktor

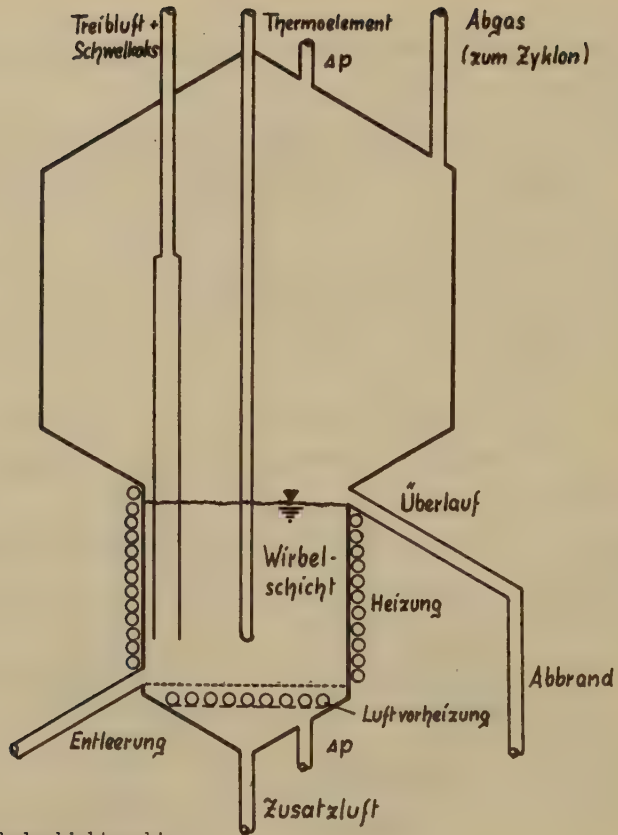


Bild 433 : Wirbelschichtreaktor

- 44 Abscheidungs-
441 teil
441 für das Flugstaubverfahren

Beim Flugstaubverfahren ist der gesamte Abbrand im Luftstrom suspendiert und muß aus diesem abgeschieden werden. Dazu wird ein Zyklon - Zeichnung 4411 - eingesetzt ²⁵⁾, dessen Abscheidegrad im Mittel bei 90% des durchgesetzten Feststoffes liegt. Im Bereiche geringer Luftbelastung bleibt dabei das Kornspektrum nahezu unverändert, während bei hoher Luftbelastung das Feinkorn angereichert wird - Diagramm 4412 - .

442 für das Wirbelschichtverfahren

Beim Wirbelschichtverfahren wird ein erheblicher Teil des Abbrandes direkt am Überlauf der Wirbelschicht abgenommen; lediglich der vom Abluftstrom mitgeführte Anteil muß vom Zyklon in gleicher Weise wie bei 441 abgeschieden werden.

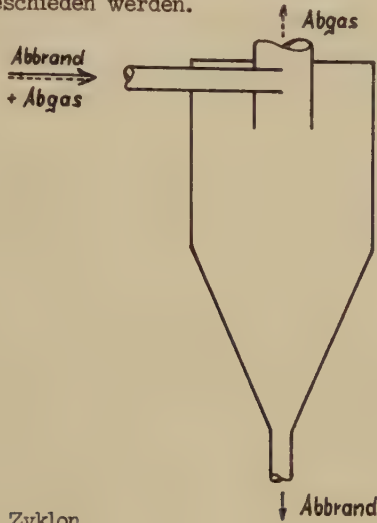


Bild 4411 : Zyklon

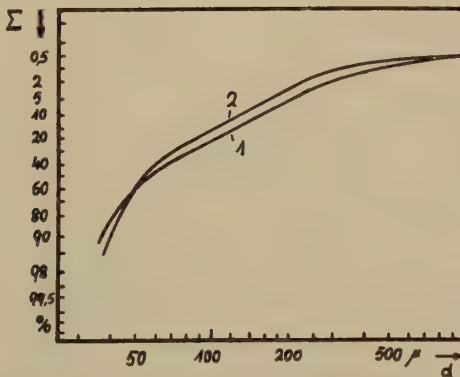


Diagramm 4412: Kornspektrum des Abgeschiedenen
Kurve 1: $4 \text{ nm}^3/\text{h}$ Luftbelastung
" 2: 19 " " "

5 Reaktionsablauf

51 Reaktion im Wirbelrohr

511 Beispiel für einen Reaktionsablauf

Der Reaktor wird - wie unter 42 beschrieben - mit Gas indirekt angeheizt; in dieser Periode wird ein Luftstrom in gleicher Stärke wie während der Reaktion hindurchgeleitet. Ist die Reaktions- bzw. Zündtemperatur im Anfangsbereich des Brennraumes überschritten, wird der Schwelkoks eingespeist, und die Leistung des Vorheizbrenners wird in dem Maße gedrosselt, in dem aus der eigentlichen Verbrennungsreaktion Wärme frei wird. In der Folge nehmen fortschreitend weitere Teile des Wirbelrohres Reaktionstemperatur an.

Das Diagramm 5111 zeigt einen typischen Temperaturverlauf während eines 400 Min. dauernden Versuches; die Vorheizperiode endet nach 250 Min., und zu diesem Zeitpunkt liegt ein geradliniges Temperaturgefälle entsprechend der Kurve 1 vor.

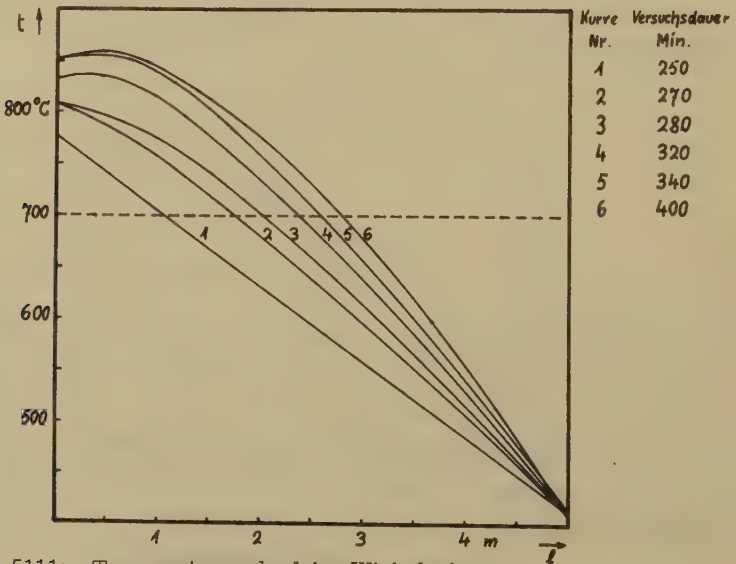


Diagramm 5111: Temperaturverlauf im Wirbelrohr

Es werden eingespeist 4,0 kg/h Schmelzkoks; diese erfordern zur vollständigen Verbrennung des darin enthaltenen Kohlenstoffes $6,0 \text{ nm}^3/\text{h}$ Luft. Es stehen zur Verfügung 4,5 nm^3/h Treibluft und 3,0 nm^3/h Zusatzluft, so daß die Reaktion mit einer Luftüberschußzahl von 1,25 - das heißt, der 1,25-fachen Luftmenge - abläuft.

Unter diesen Bedingungen brennen ab 6,8% Kohlenstoff nach 350 Min. und 7,7% nach 400 Min. Versuchsdauer, entsprechend 42,5% bzw. 48,1% des insgesamt vorhandenen Kohlenstoffes.

512 Daten mehrerer Reaktionen

Die Daten von 15 Reaktionen sind in der Tabelle 5121 zusammengestellt; die einzelnen Zeilen der Tabelle enthalten folgende Angaben:

Zeile	1	lfd. Nummer des Meßpunktes	
	2	Versuchsdauer	Min.
	3	Schmelkokseinsatz	kg/h
	4	Treibluftmenge	nm^3/h
	5	Zusatzluftmenge	"
	6	Gesamtluftmenge	"
	7	Luftüberschußzahl	
	8	Maximaltemperatur	$^{\circ}\text{C}$
	9	mittl. Reaktionstemperatur (im Bereich $t > 700^{\circ}\text{C}$)	$^{\circ}\text{C}$
	10	Länge der Reaktionszone	" m
	11	Verweilzeit	" sec.
	12	Kohlenstoff-Restgehalt des Abbrandes	%
	13	spezifische Belastung des Reaktors	$\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$

Die aus diesen Messungen erhaltenen ten lassen erkennen, daß die Reaktion unter den gewählten Bedingungen im wesentlichen erst bei 700°C einsetzt; es ist also berechtigt, als Verweilzeit nur diejenige Zeit anzunehmen, in der das Produkt eine Temperatur von $t > 700^{\circ}\text{C}$ hat. Wegen der Form des Reaktionsraumes sind mittlere und tatsächliche Verweilzeit gleich.

1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
2	10	10	33	35	55	15	30	30	40	60	20	85	20	45	75
3	1,5	1,5	1,5	1,5	6,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
4	0,6	0,6	0,5	0,5	2,4	4,8	4,5	4,5	4,5	12,0	12,0	7,25	7,25	7,25	3,5
5	4,0	4,0	3,5	2,0	5,0	3,0	3,0	3,0	0,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
6	4,6	4,6	4,0	2,5	7,4	7,8	7,5	7,5	4,5	14,0	14,0	9,25	9,25	9,25	5,5
7	0,6	0,6	1,8	1,1	0,8	1,3	1,25	1,25	0,75	2,3	2,3	1,5	1,5	1,5	0,9
8	840	820	870	800	805	730	750	800	850	650	730	895	850	825	925
9	770	760	810	720	790	710	720	760	790	675	720	780	740	740	780
10	1,5	1,5	2,0	0,8	2,0	1,0	1,2	1,6	2,0	0,0	1,0	3,0	3,0	1,0	4,0
11	0,095	0,095	0,15	0,11	0,09	0,045	0,055	0,07	0,14	0,0	0,03	0,12	0,12	0,04	0,15
12	13,0	9,8	6,3	6,7	8,8	13,2	10,9	9,2	8,3	8,8	11,8	7,2	11,8	13,5	5,6
13	47,7	47,7	47,7	47,7	191	127	127	127	127	127	127	127	127	127	127

Tabelle 5121 : Daten mehrerer Reaktionen im Wirbelrohr

Es ist mit der vorhandenen Apparatur nicht möglich, Meßpunkte in Bereichen höherer Verweilzeit als 0,15 sec. aufzunehmen. Oberhalb von etwa 600°C verzundert das Reaktionsrohr; diese Zunderschicht behindert in starkem Maße den Wärmeübergang und fördert ganz außerordentlich das Aufwachsen von Asche-Agglomeraten. Demzufolge müssen die Versuche ausnahmslos zu einer Zeit abgebrochen werden, zu der nur ein mehr oder weniger großer Teil des Reaktors die Betriebstemperatur erreicht hat - Diagramm 5111 - .

Sowohl langer Lieferzeiten wie auch beschränkter Mittel wegen konnte ein Reaktor aus zunderfreiem Stahl nicht eingesetzt werden.

513 Schlußfolgerungen

Wird die Verweilzeit gegen den erzielten Umsatz aufgetragen, so ergibt sich eine Gerade - Diagramm 5131 - ; extrapoliert man diese bis zu dem geforderten Umsatzgrad - 3,0% Kohlenstoff-Restgehalt, rechte Ordinate - ,

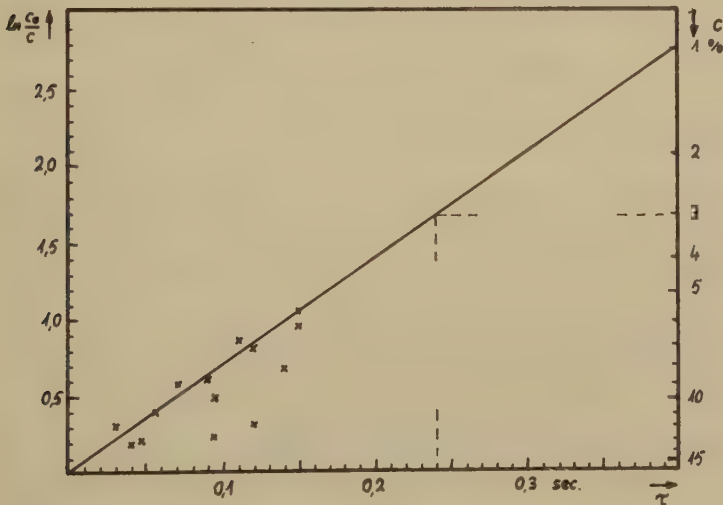


Diagramm 5131: Abhängigkeit des Kohlenstoff-Restgehaltes im Abbrand von der Verweilzeit

so ergibt sich eine notwendige Verweilzeit von 0,24 sec., und für einen noch weitergehenden Umsatz bis auf 1,0% Kohlenstoff-Restgehalt sind 0,4 sec. erforderlich.

Diese Werte stimmen mit den unter 333 aufgeführten Daten gut überein, so daß sich die dort angestellten Überlegungen, die zur entsprechenden Auslegung des Reaktors führten, als richtig erweisen.

Es ist zu erwarten, daß der Reaktor noch stärker als im Experiment - mit ca. $200 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}$ - belastet werden kann; dafür spricht u.a., daß - bei Luftüberschuß - Meßpunkte erhalten werden, die über der ermittelten Geraden liegen.

52 Reaktion in der Wirbelschicht ^{21), 22), 26)...} ³⁶⁾

520 Wirbelschicht-Zustandsdiagramm

Wirbelschicht ist eine Suspension von Feststoffteilchen in einem flüssigen oder gasförmigen Trägermedium, das mit einer solchen Geschwindigkeit entgegen der Richtung der Schwerkraft strömt, daß die von der Strömung auf die einzelnen Teilchen ausgeübten Kräfte - diese sind dem Druckabfall äquivalent - der jeweiligen Schwerkraft die Waage halten.

Für jede Wirbelschicht existieren zwei Grenzggeschwindigkeiten des Trägermediums.

Die untere Grenzggeschwindigkeit ist die Lockerungsgeschwindigkeit; bei dieser ist der Druckabfall über der noch unbewegten Schüttung gleich dem Gewicht dieser Schüttung, bezogen auf die Flächeneinheit:

$$(1) \quad \Delta p = (1 - \epsilon) \cdot (g_f - g) \cdot g \cdot H$$

Die Größe dieses Druckabfalles wird für das hier in Frage kommende laminare Gebiet durch die CARMAN-KOZENY-Gleichung

$$(2) \quad \frac{\Delta p}{H} = 150 \frac{\eta \cdot v}{d_k^2} \cdot \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3}$$

angegeben, die sich wie folgt aus dem HAGEN-POISEUILLESchen Gesetz

$$(3) \quad v_e = \frac{1}{k} \cdot \frac{r_h^2 \cdot \Delta p}{\eta \cdot l}$$

ableiten läßt:

Denkt man sich die Hohlräume der Schüttung zu einer Reihe von Kapillaren angeordnet, so kann man für deren hydraulischen Radius das Verhältnis des freien Volumens in der Schüttung zu deren innerer Oberfläche einsetzen,

$$(4) \quad r_h = \frac{\varepsilon}{F}$$

Die innere Oberfläche ist das Produkt aus spezifischer Oberfläche und Festkörperanteil gemäß

$$(5) \quad F = F_v \cdot (1 - \varepsilon) \quad \text{bzw.}$$

$$(6) \quad F = \frac{6}{d_k} \cdot (1 - \varepsilon) \quad ,$$

wenn man d_k als Durchmesser derjenigen Kugeln einführt, die den Partikeln der Schüttung oberflächengleich sind.

Mithin wird

$$(7) \quad r_h = \frac{1}{6} \cdot d_k \cdot \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}$$

Die effektive Geschwindigkeit des Trägermediums hängt von der - in der Wirbelschichttechnik üblicherweise angegebenen - Leerrohrgeschwindigkeit wie folgt ab:

$$(8) \quad v_e = \frac{v}{\varepsilon} \cdot \frac{\ell}{H}$$

dabei beschreibt der Quotient $\frac{\ell}{H}$ die Gewundenheit des Strömungsweges; sein Wert liegt bei $\sqrt{2}$.

Setzt man die so erhaltenen Ausdrücke in das HAGEN-POISEUILLEsche Gesetz (3) ein, so ergibt sich

$$(9) \quad v = \frac{1}{k} \cdot \frac{d_k^2}{\eta} \cdot \frac{\varepsilon^3}{(1 - \varepsilon)^2} \cdot \frac{H^2}{\ell^2} \cdot \frac{\Delta p}{H}$$

eine Gleichung, die bis auf geringfügige Unterschiede im Zahlenfaktor mit der CARMAN-KOZENY-Gleichung (2) übereinstimmt.

Bei der Lockerungsgeschwindigkeit v_L müssen (1) und (2) gleich sein, es folgt

$$(10) \quad (1 - \varepsilon) \cdot (g_f - g) \cdot g = 150 \cdot \frac{\eta \cdot v}{d_k} \cdot \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3}$$

sowie nach Einführen der REYNOLDS-Zahl und entsprechender Umformung

$$(11) \quad \frac{v_L^3}{d_k \cdot g} = \frac{1}{150} \cdot \frac{\varepsilon^3}{1-\varepsilon} \cdot \frac{g_f - g}{g} \cdot Re$$

Die linke Seite dieser Gleichung entspricht der FROUDEschen Kennzahl; für ein System, als dessen Daten Feststoffdichte, Zwischenkornvolumen am Lockerungspunkt sowie Dichte und Zähigkeit des Trägermediums gegeben sind, läßt sich die Abhängigkeit der Lockerungsgeschwindigkeit vom Teilchendurchmesser in dimensionsloser Form darstellen durch

$$(12) \quad Fr_L = k_1 \cdot Re$$

Die obere Grenzgeschwindigkeit für eine Wirbelschicht ist die Schwebegeschwindigkeit; hier ist die Schicht soweit aufgelockert, daß anstelle des Druckabfalles über der Schüttung - Gleichung (2) - die Endgeschwindigkeit eines im reibenden Medium frei fallenden Teilchens in die Gleichgewichtsbedingung eingeht. Für kugelförmige Teilchen und laminare Strömung gilt nach STOKES

$$(13) \quad m \cdot g = 3 \pi d \eta v$$

Führt man auch hier die REYNOLDS-Zahl ein sowie für die Masse

$$(14) \quad m = \frac{1}{6} \pi d^3 (g_f - g)$$

so erhält man nach entsprechender Umstellung

$$(15) \quad \frac{v_s^2}{d \cdot g} = \frac{1}{18} \cdot \frac{g_f - g}{g} \cdot Re$$

und in gleicher Form wie (12)

$$(16) \quad Fr_s = k_2 \cdot Re$$

Gleichungen für die Lockerungs- und Schwebegeschwindigkeit im nicht-laminaren Gebiet lassen sich in grundsätzlich gleicher Weise aufstellen; es treten dabei Widerstandsbeiwerte auf, die nicht mehr in einfacher Weise w.o. von der REYNOLDS-Zahl abhängen.

Zur bequemen Auswertung der Gleichungen (12) und (16) ist es zweckmäßig, sie in logarithmierter Form in ein $\log Re / \log Fr$ -Diagramm einzutragen; in ein derartiges Diagramm läßt sich ohne Mühe ein zweites Koordinatensystem mit den Achsen "Teilchendurchmesser d_k " und "lineare Gasgeschwindigkeit v " einzeichnen, das jeweils für ein Trägermedium bestimmter Dichte und Zähigkeit gilt.

Die Gleichungen der Achsen dieses Koordinatensystems ergeben sich wie folgt:

Drückt man Teilchendurchmesser bzw. Gasgeschwindigkeit durch die REYNOLDS-Zahl aus, so erhält man

$$(17) \quad d_k = Re \cdot \frac{\eta}{v \cdot g} \quad \text{bzw.}$$

$$(18) \quad v = Re \cdot \frac{\eta}{d_k \cdot g}$$

Werden diese Werte in die Gleichung der FROUDE-Zahl eingesetzt, so ergeben sich Ausdrücke, die bei gegebenem Trägermedium nur noch von Re sowie d_k bzw. v abhängen:

$$(19) \quad Fr = Re^2 \cdot \frac{1}{d_k^3} \cdot \frac{\eta^2}{g \cdot g^2} \quad \text{bzw.}$$

$$(20) \quad Fr = v^3 \cdot \frac{1}{Re} \cdot \frac{g}{g \cdot \eta}$$

Durch Logarithmieren erhält man Gleichungen von Geraden:

$$(21) \quad \lg Fr = 2 \lg Re + \lg \frac{\eta^2}{d_k^3 \cdot g \cdot g^2} \quad \text{bzw.}$$

$$(22) \quad \lg Fr = - \lg Re + \lg \frac{v^3 \cdot g}{g \cdot \eta}$$

und daraus somit das nachstehende Wirbelschichtzustandsdiagramm - Abbildung siehe Seite 42.

Die Bedingungen für die Existenz einer Wirbelschicht sind erfüllt für das Gebiet zwischen den beiden durch die Gleichungen (12) und (16) angegebenen Geraden, der Lockerungs- und der Schwebekennlinie; unterhalb der Lockerungskennlinie liegt eine feste Schüttung, oberhalb der Schwebekennlinie eine Flugstaubwolke vor.

Für eine Suspension mit dem mittleren Teilchendurchmesser x_1 von 60 μ , wie sie der vorliegende Schwelkoks darstellt, ergeben sich Grenzggeschwindigkeiten von 3,5 und 12 cm/sec.

Beim Betrieb des Versuchsreaktors wird die obere Grenzggeschwindigkeit

x_1 Fußnote siehe Seite 42

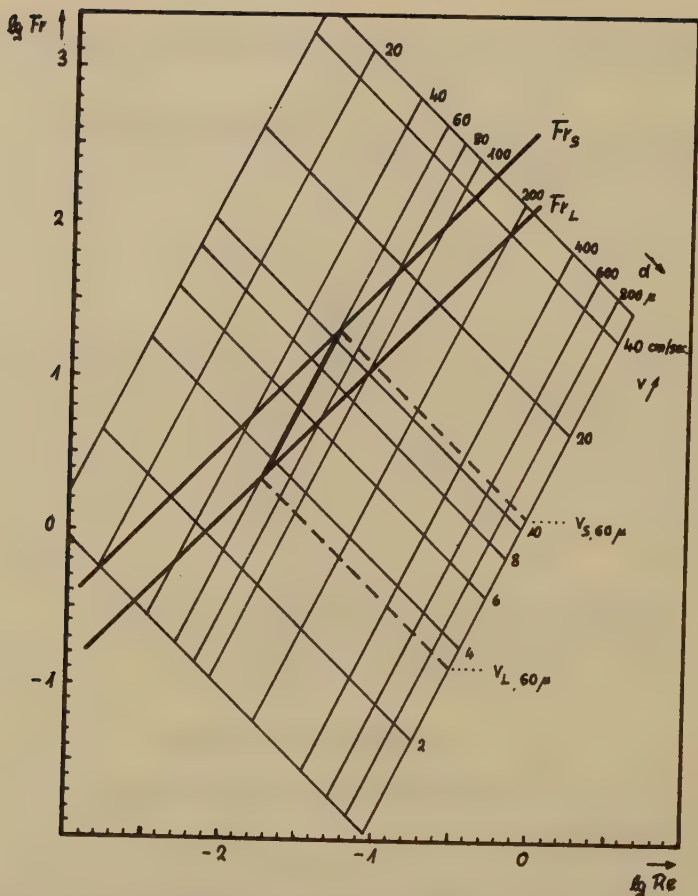


Bild 5201: Wirbelschichtzustandsdiagramm

- ^{x)} Der mittlere Teilchendurchmesser wird aus dem Teilchendurchmesser der Einzelfractionen - dem arithmetischen Mittel der jeweils benachbarten Sieböffnungen - und deren mengenmäßigem Anteil nach

$$d = \frac{1}{\sum \frac{x_i}{d_i}}$$

berechnet; ein solches Vorgehen ist zulässig, da sich innerhalb gewisser Grenzen die Eigenschaften gröberer und feinerer Teilchen kompensieren. (Ein gewisser Prozentsatz Feinkorn wird auch dann noch in einer Wirbelschicht größerer Teilchen festgehalten, wenn die Existenzgrenze für eine Wirbelschicht aus Teilchen des geringeren Durchmessers überschritten ist.)

für einzelne Bezirke der Wirbelschicht überschritten, da die Gesamtluftmenge innerhalb der Wirbelschicht durch die - für den Injektor benötigte - Treibluftmenge vergrößert wird. Als Folge davon wird ein Teil des Wirbelgutes, hauptsächlich Feinkorn, mit dem Luftstrom vorzeitig aus dem Reaktionsraume ausgetragen. Es zeigt sich, daß infolge der größeren Oberfläche des Feinkornes dieses um so viel schneller reagiert, so daß trotz der verkürzten Verweilzeit ein befriedigender Abbrandgrad erreicht wird.

Das vom Zyklon abgeschiedene Feinkorn wird dem direkt aus der Wirbelschicht abgenommenen Abbrand stets wieder zugemischt, so daß die ursprüngliche Kornverteilung und spezifische Oberfläche nahezu wieder erhalten werden.

521 Beispiel für einen Reaktionsablauf

Durch den noch leeren Reaktor wird ein Luftstrom mit der für die Ausbildung der Wirbelschicht erforderlichen Geschwindigkeit hindurchgeleitet, und dann wird der Reaktor durch Einspeisen des Schwelkokses in diesen Luftstrom hinein gefüllt. Ein solches Vorgehen ist erforderlich, da die bereits unter 411 beschriebenen Alterungserscheinungen das Anfahren einer Wirbelschicht von einer festen Schüttung her unmöglich machen.

Anschließend wird die Apparatur bis auf 400°C , die Zündtemperatur des Wirbelgutes, elektrisch aufgeheizt; danach steigt die Temperatur rasch bis auf etwa 750°C an, und nach dem Überschreiten dieses Maximums wird in gleichmäßigem Strome frischer Schwelkoks eingespeist. Dessen Menge wird so einreguliert, daß die Wärmeverluste des Reaktors durch die freiwerdende Verbrennungswärme gerade ausgeglichen werden und somit eine konstante Reaktionstemperatur eingestellt wird.

522 Daten mehrerer Reaktionen

Die Daten von 13 Reaktionen sind in der Tabelle 5221 zusammengestellt; die einzelnen Zeilen der Tabelle enthalten folgende Angaben:

Zelle	1	lfde. Nummer des Meßpunktes	
	2	Versuchsdauer	Min.
	3	Schwelkokseinsatz	kg/h
	4	Treibluftmenge	nm ³ /h
	5	Zusatzluftmenge	"
	6	Gesamtluftmenge	"
	7	Luftüberschußzahl	
	8	mittlere Reaktionstemperatur	°C
	9	mittlere Verweilzeit	Min.
	10	Abbrand W (aus Wirbelschichtüberlauf)	kg/h
	11	Abbrand Z (vom Zyklon abgeschieden)	"
	12	Kohlenstoff-Restgehalt W	%
	13	Kohlenstoff-Restgehalt Z	%
	14	spezifische Belastung des Reaktors	kg/m ² ·h

Tabelle siehe Seite 45.

523 Schlußfolgerungen

Wie aus 521 hervorgeht, hängen bei dieser Versuchsanordnung der Durchsatz und damit auch die mittlere Verweilzeit ausschließlich von der Wärmeabfuhr aus der Wirbelschicht heraus ab.

Außerdem verweilen die einzelnen Kornfraktionen wegen des durch den Luftüberschuß - siehe 520 - erfolgenden Feinkornaustrages unabhängig voneinander recht unterschiedlich lang in der Reaktionszone; der Reaktor weicht hinsichtlich der Verweilzeitverteilung beträchtlich vom idealen Rührkessel ab. Es besteht daher kein funktioneller Zusammenhang zwischen der mittleren Verweilzeit und dem Kohlenstoff-Restgehalt, und die Reaktionsdaten lassen sich nicht analog 512 auswerten. Ein demgegenüber wesentlich anderes Reaktionsverhalten ist jedoch nicht zu erwarten, so daß sich die um den Faktor 10^4 höhere Verweilzeit durch den Einbau von Kühlflächen noch entscheidend herabsetzen lassen wird. Die auf diese Weise abgeführte Wärmeenergie läßt sich - dank des hohen Temperaturgefälles - wirtschaftlich zur Erzeugung von Hochdruckdampf ausnutzen.

1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2	620	355	190	145	345	300	280	325	245	495	300	215	205
3	4,48	4,71	4,48	5,90	5,38	6,07	4,90	2,64	2,59	1,47	2,26	2,91	5,32
4	3,5	3,5	3,5	3,6	3,6	3,5	3,0	3,0	3,0	3,6	3,0	4,0	5,0
5	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	3,0	3,0	6,0	3,0
6	9,5	9,5	9,5	9,6	9,6	9,5	9,0	9,0	9,0	6,6	6,0	10,0	8,0
7	1,4	1,3	1,4	1,1	1,2	1,03	1,2	2,2	2,3	3,0	2,2	2,1	1,06
8	740	700	710	740	765	725	720	725	730	740	730	730	745
9	40	38	40	30	33	30	37	68	69	122	80	62	34
10	1,55	1,53	1,53	2,01	1,87	2,13	1,90	0,35	0,39	0,15	0,50	0,68	1,95
11	1,73	1,89	1,79	2,00	1,77	2,18	2,06	1,63	1,55	0,93	1,08	1,70	2,01
12	0,7	0,7	0,5	1,1	0,8	2,6	1,1	0,9	0,8	0,6	0,9	0,8	0,3
13	2,9	3,0	3,2	3,7	3,4	6,3	4,7	3,2	3,2	3,5	2,3	3,7	2,5
14	143	150	143	188	172	193	156	84	83	47	72	93	170

Tabelle 5221 : Daten mehrerer Reaktionen in der Wirbelschicht

6 Verwendung des Abbrandes

Der Reaktor 43 kann viele Stunden hintereinander ununterbrochen betrieben werden und ist somit geeignet, homogenes Rohmaterial für die Herstellung von Gasbeton-Probesteinen in ausreichenden Mengen - pro Stein werden etwa 4 kg Abbrand benötigt - zu liefern.

61 Beispiel für eine Gasbeton-Rezeptur

Über den funktionellen Zusammenhang zwischen den Parametern des hier zu untersuchenden Zuschlagstoffes und den Eigenschaften des daraus hergestellten Gasbetonsteines liegen keine Daten vor ³⁷⁾...⁴²⁾ .

Es werden daher Probe- und Vergleichssteine hergestellt, sämtlich nach der gleichen herkömmlichen, empirischen Rezeptur. Sie unterscheiden sich lediglich dadurch, daß für die Probesteine anstelle der bisher eingesetzten Haldenschlacke in gleicher Menge Abbrand verwendet wird. Es werden somit z. B. angesetzt

Brantkalk (90% CaO)	1,833 kg
Kesselschlacke	1,700 "
Abbrand W aus Versuch 21	1,983 "
Abbrand Z aus Versuch 21	1,984 "
Wasser	6,0 "
Al-Pulver	0,0035 " .

Die Mengen an Wasser und Al-Pulver sind nicht fest vorgegeben, sondern werden empirisch nach der Konsistenz des Gießbreies sowie dem sich entwickelnden Porenvolumen bemessen.

62 Beispiel für den Verlauf einer Gießung

Die ersten vier Bestandteile der Rezeptur 61 werden trocken homogen vermischt und anschließend mit Wasser von eingestellter Temperatur zu einem eben noch gießfähigen Brei angeteigt. Diesem Brei wird als Treibmittel Al-Pulver beigemischt - es reagiert mit dem Ca(OH)_2 unter H_2 -Bildung, das den Brei unter Bildung kleiner, gasgefüllter Zellen auftreibt - ,

und dann wird er unverzüglich in eine schwach vorgewärmte Gießform eingefüllt. Temperatur - Diagramm 621 - und Treibverhalten werden überwacht, und nachdem das Temperaturmaximum überschritten und das Treiben beendet ist, wird der Probstein wie üblich gehärtet. Dazu wird er im Autoklaven 10 bis 15 Stunden lang mit Sattedampf von 10 bis 15 atü - entsprechend 180 bis 200°C - erhitzt; dabei bilden sich wasserhaltige Ca- und Al-Silikate, die dem Steine die erforderliche Festigkeit geben.

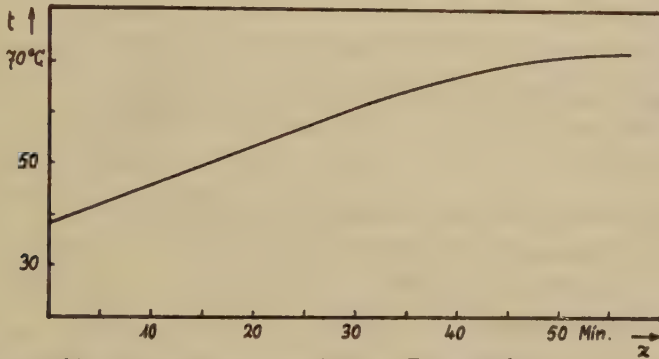


Diagramm 621: Temperaturverlauf einer Probegießung

63 Eigenschaften der erzeugten Gasbetonsteine

Die erzeugten Gasbetonsteine werden nach einer Gütezahl beurteilt, die sich aus einem Quotienten ergibt, in den die Druckfestigkeit und das Raumbgewicht eingehen. Es wird die beim Hersteller der Steine werksübliche Formel verwendet und die Gütezahl eines Vergleichssteines gleich 100 gesetzt.

Trägt man diese Gütezahl gegen den Quotienten aus spezifischer Oberfläche des Abbrandes, dividiert durch die spezifische Oberfläche der Haldenschlacke, auf, so ergibt sich das folgende Diagramm 631:

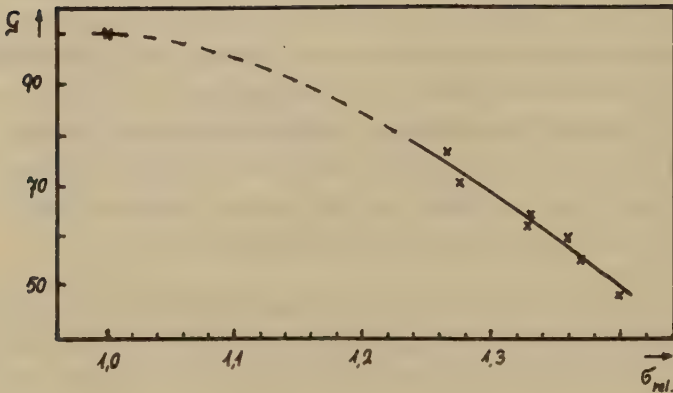


Diagramm 631: Abhängigkeit der Gütezahl von der relativen spezifischen Oberfläche

64 Schlußfolgerungen

Sowohl aus dem Gieß- und Treibverhalten der Mischung wie auch aus dem Diagramm 631 ergibt sich, daß die gegenüber der Haldenschlacke als herkömmlichem Zuschlagstoff vergrößerte Oberfläche des Abbrandes die Eigenschaften des Steines entscheidend beeinflusst. Dabei sind günstig zu bewerten der verminderte Bedarf an Treibmittel sowie das verringerte Raumgewicht, während die Klärung der Frage, ob und in welchem Maße der Festigkeitsabfall durch erhöhten Bindemittelzusatz ausgeglichen werden kann, weiterer Untersuchungen bedarf.

Wegen der Diskrepanz zwischen der Leistungsfähigkeit der Versuchsreaktoren und dem Materialbedarf für jeweils eine Probegießung wäre dazu der Betrieb eines Reaktors in halbtechnischem Maße erforderlich, zumal wegen der - bereits unter 61 erwähnten - fehlenden Daten Reihenversuche angesetzt werden müßten. Eine solche Anlage aufzustellen und zu betreiben ist im Institute nicht möglich; dies muß dem interessierten Weiterverarbeiter überlassen bleiben.

Des weiteren müßte untersucht werden, in welcher Weise sich die spezifische Oberfläche und damit die von dieser abhängige Gütezahl in Abhängigkeit von den Verfahrensbedingungen verändern, z. B. bei einer Temperatursteigerung bis nahe an die Sintertemperatur oder auch bei einem Einsatz gröberen Kornes in den Reaktor, das erst nach der Verbrennung auf die benötigte Feinheit vermahlen wird.

7 Zusammenfassung

Es werden die Verfahrensbedingungen untersucht, unter denen der Kohlenstoff des Messeler Ölschiefer-Schwelkokses entfernt wird, so daß die verbleibende Asche als Zuschlagstoff für die Herstellung von Gasbeton-Steinen geeignet ist, wobei besonderer Wert auf die Gleichmäßigkeit des Produktes gelegt wird.

Die Verbrennung erfolgt mit Hilfe zweier Verfahren, eines Flugstaubverfahrens im Wirbelrohr sowie eines Wirbelschichtverfahrens.

Es zeigt sich, daß der Kohlenstoff im Schwelkoks in außerordentlich reaktionsfähiger Form vorliegt; trotz des hohen Aschegehaltes von etwa 85% verhält sich der Schwelkoks daher hinsichtlich der notwendigen Verweilzeit im Reaktionsraum wie ein normaler, aschearmer Brennstoff. Bei einer Mahlfeinheit von $70\% < 60 \mu$ genügt eine Verweilzeit von 0,4 sec., um einen Umsatz bis zu einem Kohlenstoff-Restgehalt von 1% zu erzielen; mit diesem Wert ist die weitere Verwendbarkeit des Abbrandes einwandfrei gewährleistet.

Die Reaktionstemperatur wird zweckmäßig so gewählt, daß sie knapp unter der Sintertemperatur der Asche bleibt. Dabei ist eine gute Wärmeabfuhr aus dem Reaktionsgut heraus von Bedeutung. Als besonders günstig erweist sich in dieser Hinsicht das Wirbelrohr, in dem eine schmale Temperaturverteilung mit scharfem Maximum vorliegt, die tatsächliche Reaktionstemperatur jedes einzelnen Partikels also kaum von der mittleren Temperatur abweicht, insbesondere diese nicht wesentlich überschreitet. Daraus resultiert eine Betriebstemperatur von 900°C , während in der Wirbelschicht mit ihrer wesentlich breiteren Temperaturverteilung

750°C nicht überschritten werden können.

Im Versuchsbetrieb wird eine spezifische Belastung von etwa 200 kg/m²·h für beide Reaktoren erreicht. Insbesondere für den Wirbelschichtreaktor ist zu erwarten, daß diese Zahl erheblich erhöht werden kann, wenn die Reaktionswärme abgeführt wird.

Mit Hilfe zweckentsprechend angeordneter Wärmeaustauscher läßt sich die bei dem Prozeß freiwerdende Wärmeenergie, die in einem günstigen Temperaturgebiet anfällt, in wirtschaftlicher Weise z.B. zur Erzeugung von Hochdruckdampf verwerten.

8	Verzeichnisse
81	Verzeichnis der benutzten Symbole
811	Textsymbole
c	Konzentration
c_o	Anfangskonzentration
d	Durchmesser
d_k	Durchmesser der oberflächengleichen Kugel
d_i	Durchmesser des i-ten Anteiles
F	Oberfläche
F_V	spezifische Oberfläche
Fr	FROUDEsche Kennzahl
g	Erdbeschleunigung
G	Gütezahl
H	Höhe, Höhe der Wirbelschicht
k	Konstante
l	Länge
M	Menge
M_z	Menge pro Zeiteinheit
ΔM	Mengendifferenz
p	Druck, Gesamtdruck
Δp	Druckdifferenz
Δp_V	spezifische Leistung (des Injektors)
r	Radius
r_h	hydraulischer Radius
Re	REYNOLDSsche Kennzahl
t	Temperatur
v	Geschwindigkeit, Leerrohrgeschwindigkeit
v_e	effektive Geschwindigkeit
V_z	Gasmenge pro Zeiteinheit
$V_{n,z}$	Normalvolumen pro Zeiteinheit
x_i	i-ter Anteil
z	Zeit, Versuchsdauer

ε	Hohlraumanteil
η	dynamische Zähigkeit
ϱ	Dichte
ϱ_f	Dichte eines Festkörpers
$\sigma_{rel.}$	relative spezifische Oberfläche
τ	Verweilzeit
812	Zeichnungssymbole
	Apparat allgemein
	Kompressor
	Ventil
	Produktstrom
	Gasstrom
	Verbindung allgemein
	Druckmessung, absolut
	Druckmessung, Differenz-, Wirkdruck
	Temperaturmessung

82 **Literaturverzeichnis**

- 1) J. Endell
Zement-Kalk-Gips, Sonderausgabe 2 (1952)
- 2) Ullmann
Enzyklopädie der technischen Chemie, 3. Aufl., 1961
- 3) E. Boye
Chem.-Ztg. 83, 187...92 (1959)
- 4) W. Batel
Einführung in die Korngrößenmeßtechnik, 1960
- 5) H. Gebelein
Chemie-Ing.-Techn. 28, 773...82 (1956)
- 6) W. Batel
Chemie-Ing.-Techn. 29, 581...9 (1957)
- 7) H. E. Rose
Chemie-Ing.-Techn. 31, 183...91 (1959)
- 8) W. Wieland
Zement-Kalk-Gips 12, 516...9 (1959)
- 9) B. Kassner
Glas-Instr.-Techn. 4, 274...80 (1960)
- 10) F. Gille
Zement-Kalk-Gips 4, 85...9 (1951)
- 11) W. Wieland
Zement-Kalk-Gips 10, 81...9 (1957)
- 12) H. Lehmann, M. Koltermann
Tonind.-Ztg. 85, 233...5 (1961)
- 13) O. Winkler
Chemie-Ing.-Techn. 25, 1...11 (1953)
- 14) K. Guthmann
Chemie-Ing.-Techn. 25, 169...76 (1953)
- 15) F. Lieneweg
Tonind.-Ztg. 78, 283...9 (1954)
- 16) A. Müller
Nomographie für die technische Praxis, 1954

- 17) H. Trawinski
Dechema-Monographien 25, 29...42 (1955)
- 18) K. Hedden
Chemie-Ing.-Techn. 30, 125...32 (1958)
- 19) K. Büchner
Brennstoff-Chemie 34, 186...7 (1953)
- 20) L. W. Garret
Chem.Engng.Progr. 56, (4) 39...43 (1960)
- 21) F. Schytil
Wirbelschichttechnik, 1961
- 22) W. Brötz
Chemie-Ing.-Techn. 24, 60...81 (1952)
- 23) Koppers
Handbuch der Brennstofftechnik, 3. Aufl., 1953
- 24) R. Kusnierz-Glaz
Wärmeübertragung in Wirbelschichten, Dipl.-Arb. 1954
- 25) C. E. Lapple
Chemie-Ing.-Techn. 25, 185...91 (1953)
- 26) F. A. Zenz
Ind.Engng.Chem. 41, 2801...6 (1949)
- 27) G. Y. Shen, H. F. Johnstone
A.I.Ch.E. Journal 1, 349...54 (1955)
- 28) G. Jangg, W. Häusler
Österr.Chem.-Ztg. 57, 213...6 (1956)
- 29) E. Franz, G. Thurm
Chemie-Ing.-Techn. 33, 49 (1961)
- 30) G. Schiemann
Chemie-Ing.-Techn. 33, 725...38 (1961)
- 31) E. Wicke, K. Hedden
Chemie-Ing.-Techn. 24, 82...91 (1952)
- 32) H. S. Mickley, D. F. Fairbanks
A.I.Ch.E. Journal 1, 374...84 (1955)
- 33) F. Fetting, E. Wicke
Dechema-Monographien 24, 146...69 (1955)

- 34) Ch. Y. Wen, M. Leva
A.I.Ch.E. Journal 2, 482...8 (1956)
- 35) A. Jacob, G. L. Osberg
Can.J.Chem.Eng. 35, No. 1, 5...9 (1957)
- 36) R. Ernst
Chemie-Ing.-Techn. 31, 166...73 (1959)
- 37) W. Krämer, W. Wegener
Zement-Kalk-Gips 9, 448...54 (1956)
- 38) M. Duviez, R. Lezy
Ann.de l'Inst.du Batiment 9, No. 98, 137...57 (1956)
- 39) B. G. Singh
Journ.Am.Concr.Inst. 29, 897...907 (1958)
- 40) G. Pohl
Zement-Kalk-Gips 12, 355...61 (1959)
- 41) E. Tanner
Tonind.-Ztg. 84, 598...600 (1960)
- 42) J. E. Quincke
Bauwirtschaft 15, 239...44 (1961)
- 43) H. G. Frieese
Erdöl und Kohle 14, 702...3 (1961)

Kurz vor dem Ende des experimentellen Teiles dieser Arbeit erschien eine Veröffentlichung über "Das Rohrbach-Lurgi-Verfahren zur Gewinnung von Dampf, Strom und hydraulischen Bindemitteln aus Ölschiefer" ⁴³⁾. Es wird eine Wirbelschichtanlage beschrieben, in der Ölschiefer aus Dotternhausen, Krs. Balingen (Württ.), direkt auf Zement verarbeitet wird, im Gegensatz zu dieser Arbeit, die sich mit der Gewinnung von Zuschlagstoff befaßt.

- - -

Meinem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr. Richard Klar, danke ich für seine stete Bereitschaft zur Diskussion aller auftauchenden Fragen.

Mein Dank gilt ferner dem Hessischen Staatsministerium für Wirtschaft und Verkehr; im Rahmen des Programmes zur Förderung wirtschaftlich wichtiger Forschung, das der Stützung schwacher Industriezweige sowie der Verbesserung der Sozialstruktur notleidender Gebiete gilt, gab es die Anregung zu dieser Arbeit und ermöglichte ihre Durchführung durch die Gewährung von Sachmitteln und eines Stipendiums.

Darüber hinaus stellte auch die Paraffin- und Mineralölwerk Messel G.m.b.H., Grube Messel bei Darmstadt, Sach- und Personalmittel zur Verfügung und leistete außerdem sowohl beim Aufbau der Versuchsanlagen wie auch bei der Durchführung von Betriebstests wertvolle Hilfe, wofür ich ihr ebenfalls Dank schulde.

Lebenslauf

Ich wurde am 19. Februar 1929 in Leipzig geboren und besuchte von 1935 bis 1938 die dortige Volksschule. Im Jahre 1938 siedelten meine Eltern mit mir nach Frankfurt am Main über, wo ich zunächst weiterhin die Volksschule, von 1939 bis 1940 die Hufnagel-Mittelschule und dann das Goethe-Realgymnasium besuchte. Im Jahre 1946 wurde ich außerplanmäßig versetzt und konnte bereits 1947 die Reifeprüfung ablegen.

Im Anschluß an die Reifeprüfung arbeitete ich bei verschiedenen Firmen als Praktikant, bis ich im Wintersemester 1948/49 von der Johannes-Gutenberg-Universität in Mainz zum Chemiestudium zugelassen wurde.

Das Diplom-Vorexamen in Chemie konnte ich wegen des Mangels an Labor-Arbeitsplätzen erst im Sommersemester 1953 ablegen. Da auch im Anschluß daran die Aussichten auf Zuteilung eines Arbeitsplatzes im Praktikum gering waren, setzte ich das Studium vom Sommersemester 1954 an in Frankfurt am Main an der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität fort.

Meine Diplomarbeit mit dem Thema "Untersuchungen zu einem Bauprinzip einer Extraktionskolonne für die Flüssig-Flüssig-Extraktion" schloß ich im Sommersemester 1959 ab.

Seit dem 17. Juni 1952 bin ich verheiratet.

